

聖水大橋 崩壞事件 原因糾明鑑定團 活動白書



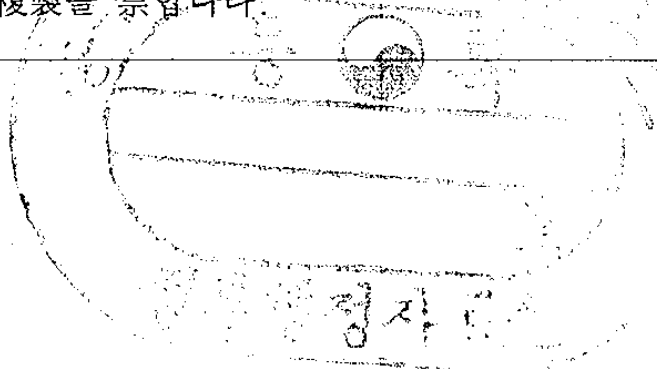
1995. 6.

서울地方檢察廳



행정안전부
국가기록원

본 冊子에 收錄된 內容은 서울地方檢察廳에서 聖水大橋 事件 搜查와 關聯하여 崩壞原因 糾明을 위한 鑑定團을 構成하여 活動, 그 結果를 收錄한 것이므로 著作權者인 서울地方檢察廳의 承諾없는 轉載와 複製를 禁합니다.



發 刊 辭

1994. 10. 21. 07:38경 일어난 聖水大橋崩壞事故는 國內外的 電波媒體를 타고 순식간에 알려져 우리 國民은 물론 全世界에 큰 衝擊을 가져오게 하였습니다. 이 事故로 이른 아침 登校하던 친진한 女學生들, 출근하던 誠實한 職場人등 32名이 영문도 모른 채 타고 있던 車輛과 함께 차가운 한강으로 墜落하여 高貴한 生命을 잃게 되었고 17名이 重傷을 입는 등 前代未聞의 慘事를 招來하여 歷史上 부끄러운 기록을 남기게 되었습니다. 서울의 江南北을 日常的으로 往來하던 1,100萬 市民들 역시 潛在的 被害者로서 한강에 놓여 있는 長大橋梁의 安全性에 대해 極甚한 憂慮를 나타내며 不安한 마음을 안고 江南北을 通行하게 되었습니다.

잘알려진 바와 같이 聖水大橋는 우리나라의 경제발전 이른바 한강의 奇蹟을 國內外에 可視的으로 내보이기 위하여 故 朴正熙 大統領의 格別한 관심 아래 浦項製鐵에서 생산한 國產 철강재와 우리의 자체 建設力量으로 完工된 橋梁이었습니다. 이와같이 聖水大橋의 象徵的 意味가 컸던만큼 이 橋梁이 長大橋梁으로서는 매우 짧은 期間인 15年만에 崩壞됨으로써 더욱 커다란 衝擊과 虛脫感을 가져 오게 하였습니다.

서울地方檢察廳은 이 事故의 重大性和 深刻性を 勘案하여 이 사건을 檢察에서 直接 搜查하기로 결정하는 한편 檢察史上 처음으로 刑事第1部, 第5部, 特別搜查第2部등 3個部를 搜查에 投入, 이 사건의 真相과 責任所在를 糾明하기 위하여 1個月餘 渾身の 努力을 다하였습니다.

우리 廳에서는 이 사건이 單純한 崩壞事故가 아닌 高度의 科學技術的인 爭點을 가지고 있음을 인식하고, 聖水大橋 關聯者들에 대한 刑事責任 뿐만 아니라 앞으로 이와같은 사고발생을 根源的으로 遮斷하기 위하여 事故의 原因을 科學的으로 徹底히 밝히기로 하고 斯界의 專門家 7人으로 聖水大橋 崩壞事件 原因糾明 鑑定團을 구성하여 1억1천만원의 豫算을 지원, 활동하게 하였습니다.

이에 따라 鑑定團은 1994. 11. 1. 結成되어 1995. 3.까지 약 5個月間 누차에 걸친 現場調査와 精密한 科學的 實驗 및 徹底한 分析을 完了하고 우리나라 土木史上 유래 없는 300餘쪽에 달하는 龍大한 分量의 調査報告書를 작성하여 우리 廳에 제출하였습니다.

이 調査報告書는 聖水大橋 崩壞原因에 대한 綜合的이며 科學的, 實證的 報告로서 그 客觀性和 公正性은 報告書에 나타나 있는 各種 資料와 實驗 그리고 分析方法등이 이를 充分히 立證하고 남음이 있다고 믿고 있습니다.

우리 廳은 鑑定團 活動과 調査結果가 앞으로 이와 類似한 事件의 調査 處理와 長大橋梁의 建設 그리고 維持管理에 貴重한 參考資料가 되리라고 判斷하여 이 冊子를 發刊하게 되었습니다.

끝으로 嚴冬雪寒을 介意치 아니하고 原因糾明에 獻身的 努力을 아끼지 않으신 安致燮단장을 비롯한 鑑定團 構成員諸位께 깊은 感謝를 드리고 聖水大橋 搜查에 盡力한 여러 檢事들에게도 激勵을 보내고자 합니다.

아울러 이 冊子가 聖水大橋事故 犧牲者の 高貴한 生命과 被害者 家族의 苦痛을 創造的으로 昇華하여 이 땅에서 不實工事時代의 終焉을 告하고 先進建設 韓國을 이룩하는 하나의 礎石이 되기를 期待합니다.

1995. 6.

서울 地方 檢察 廳

檢事長

崔永光

目 次

第1編 鑑定團의 構成과 活動	5
1. 鑑定團의 構成經緯	7
1-1 머리말	7
1-2 鑑定團 構成 檢討報告	9
2. 鑑定團의 發足	15
2-1 鑑定團 人選	15
2-2 發足과 活動開始	16
2-3 行政支援班 編成 및 活動	17
2-4 서울地方檢察廳과 鑑定團의 關係	19
3. 鑑定團의 活動日誌	21
4. 搜查·公判過程에서의 鑑定團 活動	23
5. 鑑定團 活動의 評價	25
第2編 鑑定團의 鑑定 報告	27
1. 序 論	31
1-1 概 要	31
1-2 橋梁 沿革	32
1-3 當時 建設行政 現況	32
1-4 當時 橋梁建設 技術現況	34

2. 橋梁 外觀 調査	35
2-1 概 要	35
2-2 崩壞 現況 調査	36
2-3 外觀 調査	39
2-4 問題點	56
3. 非破壞試驗	57
3-1 概 要	57
3-2 試驗方法 및 內容	58
3-3 鑑定 및 考察	61
3-4 疲勞試驗을 위한 試驗片 形狀基準	68
4. 材料 試驗	69
4-1 概 要	69
4-2 試驗方法 및 內容	69
4-3 鋼材化學成分 分析	71
4-4 強度試驗	76
4-5 疲勞試驗	84
4-6 其他試驗	129
4-7 載荷試驗	140
4-8 試驗結果의 要約	176
5. 設計內容 및 鑑定	178
5-1 概 要	178
5-2 橋梁 計劃	178
5-3 設計內容 檢討	180
5-4 分析 및 考察	197

6. 施工內容 鑑定	198
6-1 概 要	198
6-2 施工資料 檢討	198
6-3 鎔接 施工 檢討	199
6-4 組立 架設	213
6-5 分析 및 考察	214
7. 監理 및 維持管理 內容 鑑定	215
7-1 概 要	215
7-2 監理上 問題點 檢討	215
7-3 重車輛에 대한 分析	216
7-4 設置된 Bracket와 가로보 支持構造物의 影響分析	220
7-5 維持 管理上 問題點	239
8. 直接 崩壞原因 分析	241
8-1 概 要	241
8-2 直接 崩壞原因	247
8-3 崩壞 危險度 分析 理論	252
8-4 崩壞 Mode 解釋	263
8-5 崩壞原因 分析	271
8-6 綜合考察	327
9. 崩壞原因의 綜合的 鑑定	330
9-1 概 要	330
9-2 崩壞의 根本原因	331
9-3 崩壞의 直接原因	334
9-4 崩壞의 間接原因	339

9-5 綜合考察	342
10. 結論 및 向後對策	345
10-1 概 要	345
10-2 綜合 結論	345
10-3 行政 對策	346
10-4 技術上 對策	347
第3編 附 錄	351
1. 聖水大橋 事件 公訴狀 寫本	353
2. 破斷된 링크垂直材에 設置된 Bracket와 가로보 支持構造物이 垂直材에 미치는 構造的 影響 分析(事故內容 補充說明資料)	401
3. 鑑定人 龍煥鮮 教授(서울地方法院 聖水大橋 事件 第1審 法院 選定)의 鑑定結果에 대한 意見書	413
4. 聖水大橋 工事報告書(서울特別市) 寫本 (交通量調査, 設備, 結言, 트러스設計圖面 部分)	423
5. 事故現場 寫眞	453
6. 非破壞撮影 寫眞	463
7. 參考資料 目錄	467
□ 編輯後記	471

第1編 鑑定團의 構成과 活動



행정안전부
국가기록원



행정안전부
국가기록원

1. 鑑定團의 構成經緯

1-1 머리말

1994. 10. 21. 07:38 서울 江南區 鴨鳩亭洞과 城東區 聖水洞을 연결하는 橋長 1,160m의 聖水大橋 제10번과 제11번 橋脚 사이의 상부트러스 48미터가 갑자기 崩壞되면서 그 위를 지나가던 자동차6대가 한강으로 墜落하여 乘客 32名이 死亡하고 17名이 重輕傷을 입는 前代未聞의 大型慘事가 발생하여 全國民을 驚愕케 하였다.

서울地方檢察廳에서는 사건의 重大性을 勘案하여 이사건을 직접 수사하기로 결정하고 搜查本部(本部長 第2次長檢事 辛光玉)를 설치하여, 刑事第1部(部長檢事 李旻在)는 聖水大橋 設計 및 施工 분야를, 刑事第5部(部長檢事 李哲)는 聖水大橋 維持管理 분야에서 서울시 동부건설사업소 공무원들을, 特別搜查第2部(部長檢事 郭永哲)는 서울시 本廳 공무원들을 수사하도록 각 업무를 분담하였다.

聖水大橋 崩壞事故는 設計·施工上의 瑕疵有無를 철저히 검증하지 않으면 真相糾明이 불가능하고, 특히 TRUSS 工法에 의한 聖水大橋 設計·施工은 高度의 精密科學·技術의 產物이므로 이에 대한 設計·施工상의 瑕疵有無糾明에는 關係 專門家團에 의한 公正하고 徹底한 檢證·鑑定이 절대적 前提條件으로 擡頭되었다. 그리고 公正하고 明確한 원인규명이 이루어지지 아닐 경우, 公判過程에서 設計·施工·維持管理 단계간의 技術論爭이 치열할 것으로 당연히 예상되었고, 나아가 수사결과의 신뢰성 및 인과관계와 관련하여 判決에도 결정적 영향을 미칠 것으로 展望되었다. 한편, 聖水大橋 사고원인의 과학적·기술적 규명은 聖水大橋의 復舊 또는 新設의 중요한 基礎資料

가 될 뿐만아니라, 앞으로 한강상에 長大橋梁을 건설하는 데 귀중한 참고 자료가 될 수 있으므로 필히 鐵鋼構造分野 專門家들로 鑑定團을 구성하여 붕괴원인을 규명할 필요가 있었다.

이러한 判斷에 터잡아, 서울地方檢察廳에서는 聖水大橋 붕괴사건 수사와 관련하여 사고원인을 규명하기 위한 鑑定團 구성을 檢討하게 되었다.

聖水大橋 붕괴사건 발생직후 刑事第5部에서 申(), 金(), 李(), 張(), 張(교수), 申(), 龍()등으로 현장 조사를 위한 專門家팀을 구성하였으나, 동 전문가팀에는 聖水大橋 設計에 참여한 申(교수)가 팀장으로 되어 있었고, 구성원들이 申(교수의 추천으로 참여하게 되었으며, 사고발생전에 서울시의 의뢰를 받아 聖水大橋등 서울시가 管理하는 한강교량을 安全診斷한 전력이 있는 구성원들이 相當數 포함되어 있어 감정결과에 대한 신뢰성이 떨어질 가능성이 있을 뿐만아니라, 사고직후 수사상 긴급히 聖水大橋 사고현장 확인을 위하여 구체적인 전문분야등을 상세히 고려하지 않은 채 구성된 팀이므로 이는 현장확인으로 그 任務를 終了하도록 하고, 이사건 수사에 어떤 내용의 偏頗的인 影響이라도 미칠 수 없도록 學界와 實務界, 官界에서 각 전문분야등을 적정히 配分하여 中立的인 人物로 鑑定團을 구성하게 되었다.

鑑定團은 서울地方檢察廳의 의뢰에 따라 鑑定을 遂行하는 獨自機構임과 아울러 設計・施工・維持 管理上の 사고원인 규명에 관하여 搜查上 必要한 기술적 사항의 諮問을 수행하는 자문기구의 性格을 갖는 限時的 TASK FORCE로 서울地方檢察廳에 설치하기로 하였다.

1-2 鑑定團 構成 檢討報告

1-2-1 檢討 報告書

성수대교 붕괴사고가 발생한 직후, 수사본부에서는 현장조사 및 붕괴원인을 조사하는 과정에서 성수대교의 설계도면, 시방서등의 검토와 철강구조도로교에 대한 전문적인 내용의 자문을 위하여 건설부 소속 기술공무원 2명(서기관 金榮煥, 사무관 朴贊範)을 파견받았고, 나중에 보다 고도의 기술적인 내용을 파악하기 위하여 건설부 기술국에서 추천한 한국건설기술연구원 구조연구실장 方明錫(공학박사, 구조기술사)을 추가로 파견받아 수사과정에서 자문을 받게 되었다.

위와같이 파견받은 전문가 3명은, 성수대교 붕괴원인을 규명하기 위하여는 한두명의 전문가로서는 원인규명이 거의 불가능하고, 그전에 발생하였던 幸州大橋崩壞事故, 八堂大橋崩壞事故의 경우와 마찬가지로 여러명의 전문가로 구성된 감정단을 구성하여 붕괴원인을 다각적으로 분석, 검토하는 것이 緊要하며, 특히 철강구조의 교량은 많은 부분이 용접으로 제작되어 있기 때문에 반드시 용접전문가를 감정단에 포함시켜서 용접부분을 정밀하게 검사할 필요가 있다는 의견을 建議하였다.

위와같은 建議를 받아, 서울地方檢察廳에서는 聖水大橋 崩壞事故原因을 철저히 규명하기 위하여는 학문적, 기술적으로 충분한 능력을 갖춘 전문가단을 구성할 필요가 있다는 사실을 인정하고, 刑事第1部에서 鑑定團을 구성하는 방안을 검토하여 다음과 같은 檢討報告書를 작성하여 1994. 10. 28. 大檢察廳에 보고하고 승인을 받았다.

檢討報告書의 내용은 다음과 같다(全文 掲載).

성수대교 붕괴사고 원인규명 감정단 구성검토 보고서

1. 구성필요성

- 성수대교 붕괴사고는 설계·시공상의 하자유무를 철저히 검증하여야만 진상규명 가능함
- 특히 TRUSS 공법에 의한 성수대교 설계·시공은 고도의 정밀과학·기술의 산물이므로, 이에 대한 설계·시공상의 하자유무 규명에는 관계전문가단에 의한 공정하고 철저한 검증·감정이 절대적 전제조건임
- 공정·명확한 원인규명이 이루어지지 아니할 경우, 공판과정에서 설계·시공·유지관리 단계간의 기술논쟁이 치열할 것으로 예상될 뿐만아니라 수사 결과의 신뢰성 및 인과관계와 관련하여 판결에도 결정적 영향을 미칠 것으로 전망됨
- 성수대교 사고원인의 과학적·기술적 규명은 성수대교의 복구 또는 신설의 중요한 기초자료가 될 뿐만아니라, 앞으로 한강상의 장대교를 건설하면서 귀중한 참고자료가 될 수 있음

2. 감정단 구성

가. 명 칭

성수대교 붕괴사고 원인규명 검증·감정단(약칭 감정단)

나. 성 격

- 감정단은 설계·시공상의 사고원인 규명에 관하여 기술적 사항의 자문을 수행하는 자문기구임
- 한시적 TASK FORCE로 설치

다. 설 치

- 서울지방검찰청에 둠

라. 인선기준

- 성수대교 설계·시공과정에 관여한 사실이 없을 것
- 성수대교 설계·시공자와 혈연등 특별한 관계가 없을 것
- 學界, 實務界, 民間 및 公共機關을 포함 적정비율 구성

마. 구성인원

- 별지와 같음(생략)

바. 편 성

- 감정단
- 행정지원반(반장 : 서울지검 형사제1부 검사 이정희)
 - 검 찰
 - 행정지원부서간의 조정, 감정단의 연락
 - 교량관리청(서울시)
 - 서울시 사고대책본부 총괄국장
 - 현장조사를 위한 선박, 소방차등 지원
 - 경 찰
 - 동부경찰서장
 - 현장경계, 보존 및 안전조치

3. 구성시기, 활동기간 및 예산

가. 구성시기

- 1994. 11. 1.

나. 활동기간

- 성수대교 붕괴사고 원인규명을 위한 활동완료시까지 한시적 활동
- 정밀감정서 작성완료시기 약 3개월 소요

다. 예 산

- 별도 검토
- 소요예산액(예상)
 - 1개의 대형교량에 대한 정밀진단의 경우 : 약1억원이상 추정

라. 활동일정

- 활동일정
 - 사고지점에 대한 조사 : 1994. 11. 10. 까지
 - 교량전반에 대한 조사 : 1994. 11. 11. ~ 11. 30.
 - 잠정결과 : 1994. 11. 20.까지
 - 최종결과 : 1994. 1. 31.

4. 관련 조치사항

가. 현장보존

- 검·경 합동수사본부의 지휘하에 현장보존
 - 보존책임 : 동부경찰서장
- 토목전문가의 견해
 - 사고원인의 정밀감정에 약 3개월이상 소요
 - 최소한 위 기간동안 현장보존 필요
 - 감정단의 판단에 따라 연장
 - * 현장보존으로 인한 교량복구·개축등 지연 또는 장애 우려 없음

나. 현장 조사 지원

○ 현실태

- 교각 상판에서는 정확한 검증이 어려움
- A TRUSS 하현재 부분, 붕괴된 S-TRUSS 부분 접근 곤란
- 붕괴된 부분에서 교각상판으로 올라갈 수 있는 사다리 미설치

○ 서울시와 경찰 합동으로 현장조사지원반 구성

- 서울시
 - 고가 탐차, 바지선, 5, 6번 교각에서 바로 상판으로 올라갈 수 있는 임시 사다리 설치
- 동부경찰서
 - 현장경계, 보존 및 안전조치

1-2-2 大檢承認

1994. 10. 28. 형사제1부에서 성수대교 붕괴사고 원인규명을 위한 鑑定團 구성의 필요성에 대한 검토보고서를 작성하고, 이를 大檢察廳(檢察總長 金道彦)에 제출하여 鑑定團 구성에 대한 承認을 받고, 동월. 31. 內部決裁를 받아 鑑定團 구성을 확정하고, 동년. 11. 1. 구성 소집하고, 동월. 3. 大檢察廳에 이를 보고하였다.

1-2-3 豫算措置

鑑定團 구성 검토과정에서 법무부에 鑑定團 구성, 운영에 소요되는 예산 106,000,000원을 지원하여 주도록 요청하여 승인을 받았다.

예산내역은, 시험의뢰비 67,000,000원(강도 및 피로시험 35,000,000원, 비파괴검사 14,000,000원, 재하시험 18,000,000원), 경비 18,464,000원

(구조계산 의뢰비 5,000,000원, 인쇄비 5,000,000원, 재료비 2,000,000원, 잡비 4,000,000원, 여비 2,464,000원), 鑑定團 활동비 20,536,000원등
합계106,000,000원으로 결정되었다.

예산은, 1994년도에 65,000,000원, 1995년도에 41,000,000원이 각
집행되었다.

감정단 구성 검토과정에서 막대한 금액의 예산확보는 가장 어려운 문제로
擡頭되었다. 서울시(시장 禹明奎)에서는 감정단이 성수대교의 붕괴원인에
대한 감정업무를 담당하여 서울시와도 관계가 있으므로 감정단에 관한 예산
을 서울시에서 전액부담할 것을 제의하였으나, 서울시가 성수대교의 공사발
주자이자 유지관리청인 점에 비추어 감정결과의 공정성, 객관성을 의심할
소지가 있어 검찰자체 예산을 확보하여 줄 것을 법무부와 대검찰청에 건의
하여 승인을 받았다.

2. 鑑定團의 發足

2-1 鑑定團 人選

鑑定團構成員은 鐵鋼構造橋梁분야에 대한 國內 最高水準의 전문가로 구성 하되 公正하고 客觀的인 감정을 위하여 성수대교 설계·시공과정에 關여한 사실이 없고, 성수대교 설계·시공자와 堧연등 특별한 關係가 없는 인물로 委囑하고, 學界, 實務界, 民間 및 公共機關을 포함하여 適正비율로 구성하기로 하였다.

構成員은 아래의 表와 같다.

姓 名	年 齡	勤 務 處	經 歷	備 考
安致燮		주식회사 우대 기술단 회장		實務界 團 長
張錫潤		서울 시립대 교수		學 界
趙孝男		한양대 교수		學 界
張丞弼		서울대 교수		學 界
成天慶		주식회사 유신 설계공단 기술 연구소장		實務界
方明錫		한국건설기술연 구원 구조연구실장		實務界 官 界 幹 事
張峰增		사단법인 한국 선금 검사관		鎔 接

2-2. 發足과 活動開始

1994. 11. 1. 서울地方檢察廳 검사장실에서 崔永光 검사장이 辛光玉 제2 차장검사, 李旻在 형사제1부장검사, 李正喜 검사가 배석한 가운데 위 전문가 7명을 鑑定團構成員으로 委囑하여 鑑定團이 發足되었고, 검사장은 全國民에게 엄청난 충격을 준 성수대교 붕괴사건의 重大性에 비추어 歷史的 使命感을 가지고 붕괴원인을 과학적, 기술적으로 철저히 조사, 분석하여 객관적으로 신뢰할 수 있는 公正하고 明確한 鑑定을 하여줄 것을 당부하였다.

鑑定團 사무실은 서울지방검찰청 403호실에 두고, 활동기간은 1994. 11. 1.부터 1995. 1.말까지 3개월 예정으로 발족 즉시 활동을 개시하였으며, 鑑定團會議에서 團長에 安致燮을, 幹事에 方明錫을 선출하였다.

사무실에는 각 단원들의 사무용 책상과 회의용 탁자를 비치하고, 연락전화를 가설하고, 직원1명(검찰주사보 崔鳳浩)을 배치하여 감정단원들에 대한 연락, 자료의 수집 및 정리등의 업무를 담당토록 조치하였다.

鑑定團에서는 설계·시공상의 過誤나 不實要因들이 붕괴에 미친 영향에 대한 철저한 檢證 및 鑑定을 통하여 붕괴원인을 규명하고, 검찰의 搜查 및 公判過程에서 기술적인 사항에 대한 諮問을 수행하며, 鑑定結果를 보고서로 작성, 提出하여 장래 성수대교 復舊 또는 新設의 중요한 基礎資料로 활용할 뿐만 아니라, 主要 橋梁 건설시에 대비한 設計 및 施工, 示方에 반영하거나 귀중한 참고자료로 활용할 수 있도록 最善의 努力을 다하기로 다짐하였다.

2-3 行政支援班 編成 및 活動

2-3-1 행정지원반 편성

서울地方檢察廳에서 鑑定團을 운영하면서 鑑定團活動을 원활하게 하기 위하여 검찰, 경찰, 서울시의 유관부서로 行政支援班을 編成하였다. 行政支援班의 班長은 刑事第1部 李正喜 檢事로 지정되었다. 서울地方檢察廳 刑事第1部는 행정지원 부서간의 조정, 鑑定團 연락등 총괄적인 지원을 하고, 서울시(성수대교 사고대책본부장 具惇會)는 현장조사를 위한 선박, 소방차 동원, 성수대교 현장 출입용 비계설치등 시설지원을 하고, 동부경찰서(경찰서장 李炳珍)는 현장보존, 경계 및 안전조치등 현장업무를 지원하기로 하였다.

2-3-2 행정지원 내용

○ 서울지방검찰청 제공자료

- 성수대교 설계도면 서울특별시, 주식회사 대한콘설탄트

※ 서울시보존의 트러스트부분 설계도는 경북 청도군에 있는 서울시문서보존소에 보관된 것을 제출받음

- 구조계산서 서울특별시, 주식회사 대한콘설탄트

- 종합보고서(성수대교건설공사실시설계) 서울특별시,주식회사 대한콘설탄트

- 강도로교설계표준시방서(1962) 국토건설청

- 철근콘크리트표준시방서(1962) 건설부

- 콘크리트표준시방서(1962, 1982) 건설부

- 용접강도로교표준시방서(1971) 건설부

- 콘크리트도로교설계표준시방서(1972) 건설부

- 도로구조령해설(1982) 사단법인 한국도로협회

- 성수대교 공사보고서 서울특별시

※ 공사보고서는 공사당시의 서울시 감독계장 김석기가 작성하여 서울시
에 보관된 자료임

- 교통량자료 서울시

(‘94. 8.~9. 과적차량단속 유형별실적 및 처리결과, 과적차량 고발사례)

- 교통량자료 서울특별시지방경찰청 교통발전연구실

(‘93.서울시교통량자료, ‘94. 상반기 서울시교통량자료, 주요트럭의 제원표)

- 교통량자료 서울특별시 교통관리사업소

(‘89.~’92. 한강상교량의 일일교통량 및 일일트럭교통량, 트럭교통량중
종류별트럭교통량)

※ 교통량자료는 서울시 교통관리사업소, 서울지방경찰청 교통발전연구
실등에 자료를 요청하였음

- 레미콘 판매일지(‘94년 4월, 10월) 삼표산업주식회사

※ 삼표산업주식회사의 레미콘공장이 성수대교 북쪽 인근에 위치하고 있
어 가장 정확한 교통량(특히 과적차량)분석을 위하여 동 회사의 실제
판매일지를 제출받음

○ 서울시 시설,장비 지원

- 현장확인시 바지선, 소방용사다리차 지원

- 성수대교 트러스 8개소에 출입용 작업대 설치

○ 동부경찰서 현장보존 지원

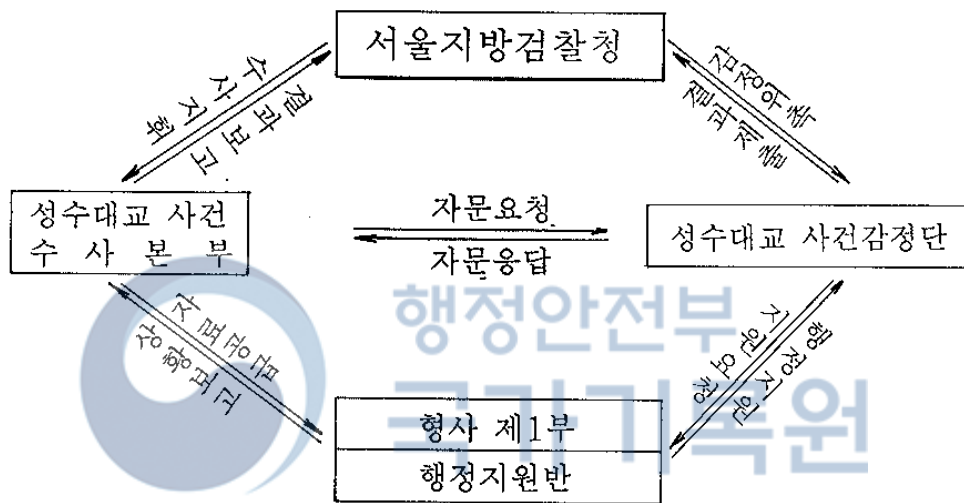
- 1994. 10. 21.부터 1994. 12. 31.까지 현장 보존, 경계

※ 사고직후 군부대에서 성수대교 교각에 부교를 가설하는 훈련을 실시
하겠다고 요청하였을 뿐만 아니라, 서울시측에서는 붕괴되어 강상에
추락되어 있는 모양이 외관상 매우 흉물스러워 특히 외국관광객들에
게 나쁜 인상을 줄 수 있다거나, 조속한 복구공사 착공필요등을 이유
로 신속히 철거하도록 하여줄 것을 요청하는 등 현장보존에 많은 애
로가 있었음.

2-4 서울地方檢察廳과 鑑定團의 關係

2-4-1 關係圖

서울地方檢察廳과 鑑定團의 關係를 圖形으로 나타내 보면 다음과 같다고 할 수 있다.



2-4-2 兩者關係의 性格

○ 設 置

성수대교 사건 搜查本부와 鑑定團은 모두 서울地方檢察廳에 설치되었다. 兩者는 각 獨立的으로 설치된 것으로서 서로 從屬關係가 아니고, 對等한 地位로 설치된 것이다.

○ 活 動

위 수사본부와 감정단은 각자 獨立的으로 활동하였다. 다만, 鑑定團이 對外的인 관계에서 獨自性을 가진 獨立機關이 아니므로, 資料協助 要請등 對外的인 활동에서 있어서는 서울地方檢察廳 名義로 업무를 支援받게 되었다.

○ 諮問關係

수사본부와 감정단은 앞에서 본 바와 같이 서로 獨立的으로 설치되고, 獨自적으로 활동하였다. 다만, 수사과정이나 공판과정에서 專門的, 技術的인 問題에 대하여는 수사본부가 提供하는 資料에 대하여 鑑定團이 諮問을 하는 關係에 있었다.



행정안전부
국가기록원

3. 鑑定團의 活動日誌

일 시	장 소	참 석 자	활 동 내 용
94.11.1	서울지검 403호실	전 원	- 감정단 발족(단장 안치섭, 간사 방명석) - 11.2. 사고현장확인후 감정단 활동계획 수립 토의
11. 2		현장: 안치섭, 조효남, 방명석, 성천경, 장봉증 토의: 장석운, 장승필, 조효남, 방명석, 성천경, 장봉증	- 현장조사 실시 - 토 의 • 분야별 업무분담 • 분야별 수행계획 및 예산검토
11. 9		안치섭, 조효남, 장석운, 방명석, 장봉증	- 향후 추진계획 수립 - 교통량 DATA 요청 - 분야별 책임자 결정
11.16		장석운, 조효남, 장승필, 방명석, 장봉증	- 피로시험 계획 토의 - 사고현장 비계설치방안 확정
11.23		안치섭, 장석운, 조효남, 방명석, 성천경, 장봉증	- 피로 및 강도시험 계획 수립 - 비계설치 독촉 (12.3.까지 설치 요망) - 자료요구사항 제시 • 교통량 데이터(서울시, 서울지방경찰청, 교통개발연구원): 한강상 교량의 총교통량 및 일일트럭교통량(ADTT), 성수대교 교통량, 트럭교통량중에서 輕트럭, 中트럭, 重트럭 종류별 구성비, 주요트럭 제원(축거리, 축중, 적재적량), 과적단속 데이터
11.30		장석운, 방명석	- 비계설치 독촉 - 비계설치 지연으로 인한 감정활동 지연통고
12. 7		안치섭, 성천경, 방명석, 장봉증	- 성수대교 붕괴사고 부재(트러스 중요부분) 12개소 절단.수거방법 토의 - 수거하는 부재 시험계획 토의
12. 9		안치섭, 성천경, 방명석, 장봉증	- 성수대교 사고현장에서 수거할 파단부분 대상, 수거방법 지정 • 작업자: 성도건설주식회사(이사 김태훈) • 서울시 한강대책본부 계장 김구환 • 서울시 동부건설사업소장 임병순 • 동아건설 부사장 박영철 등이 참석
12.12 ~12.14			- 수직재등 파단부재 11점 수거(재료시험용 1개 별도)

일 시	장 소	참 석 자	활 동 내 용
12.14	서울지검 403호실	안치섭, 성천경, 방명석, 장봉증	- 성수대교 붕괴현장에서 채취한 부재 11 개 감정에 대한 토의
12.14		성천경, 장봉증	- 한국기계연구원과 피로시험 협의
12.14		장봉증	- 산업과학기술 연구소와 재료시험 협의
12.14		조효남	- 성수대교 현장 재하시험 실시 - 쌍용양회 연구개발본부 진단기술실
12.21		안치섭, 장석윤, 조효남, 성천경, 장봉증	- 재료시험계획 토의 - 업무 신속추진 결의
94.12.14 ~12.21		장봉증	- 성수대교 111개소 비파괴시험 - 주식회사 아이텍
12.28		안치섭, 장봉증	- 재료시험계획 수립 - 주식회사 아이텍 비파괴시험 결과 검토
95.1.11		안치섭, 장승필, 성천경, 방명석	- 재료시험 내용검토 - 보고서 목차(안)작성, 작성자 선정
1.28		안치섭, 장승필, 성천경, 방명석, 장봉증	- 중간보고서 작성내용 협의 - 피로시험 계획 검토
2.15		안치섭, 조효남, 성천경, 방명석	- 중간보고서 초안 검토 - 수직재에 부착된 브라켓(까치발)분석 보 고서 검토
2.22		방명석	- 중간보고서 제출
2.27		안치섭, 조효남, 성천경, 방명석	- 최종보고서 작성 내용 검토 - 피로시험 방향 협의
3. 8		안치섭, 장석윤, 조효남, 성천경, 방명석, 장봉증	- 피로시험 결과 토의 - 최종보고서 집필 및 발간일정 협의 - 보고서중 미작성부분 작성계획 협의
3.14		안치섭, 조효남, 성천경, 방명석, 장봉증	- 피로시험 결과 및 보고서 작성 토의 - 보고서 집필 일정 협의
3.21		장석윤, 조효남, 성천경, 방명석	- 피로시험 결과분석 - 보고서 최종본 정리
3.29		전원	- 감정보고서 내용 최종 확정
4. 4		안치섭, 장승필, 조효남, 방명석	- 최종보고서 제출

4. 搜查·公判過程에서의 鑑定團 活動

聖水大橋 붕괴사건은 대부분 교량공학, 트러스구조등에 대하여 기술적으로 대단히 어려운 전문지식을 요하는 내용을 포함하고 있어 수사를 담당한 비전문가인 검사들로서는 기술적인 내용을 상세히 파악한다는 것은 참으로 어려운 일이었다. 設計도면, 시방서등에 대한 내용파악은 물론 사고현장에서 聖水大橋의 사고부분등이 設計도면과 같이 제작, 施工되어 있는지 여부에 대한 확인에도 鑑定團構成員들의 자문을 얻지 않으면 불가능한 일이었다. 특히 교량의 力學構造, 각 트러스 部材의 規格, 鎔接, 腐蝕與否등은 고도의 전문지식을 갖지 않으면 이해될 수 없는 내용들이었다. 鑑定團은 수회에 걸쳐 聖水大橋사고 현장을 확인하여 施工상태를 조사, 측정하였고, 施工者인 동아건설산업주식회사가 제시한 부실施工이 아니라는 내용의 의견서에 대하여 기술적인 부분을 상세히 검토한 의견을 제시하여 이를 反駁할 수 있었으며, 특히 鑑定團構成員중 張丞弼, 方明錫, 張峰增은 확인된 내용들에 대하여 참고인으로서 상세히 진술하여 작성된 진술조서를 법원에 증거로 제출하였다.

공판과정에서는 鑑定團構成員중 安致燮, 張丞弼, 方明錫, 張峰增이 증인으로 출석하여 공소사실에 관련된 기술적인 내용과 붕괴원인에 대하여 상세히 증언하였고, 특히, 張丞弼은 공판과정에서 밝혀진 聖水大橋 보수과정에서 설치된 것으로 확인된 트러스 수직재에 부착된 까치발 모양의 Bracket이 수직재 파단에 미친 영향에 대하여 상세하고 명확하게 분석한 보고서를 제출하여, Bracket을 설치하게 된 이유는 施工당시 트러스 가로보를 규격보다 짧게 제작하여 가로보와 상현재의 연결부를 設計내용에 따라 볼트연결을 하지 못하고 부득이 용접으로 연

결하면서 심히 부실하게 용접함으로써 가로보가 아래로 처질 수 밖에 없도록 施工되어 이를 보완하기 위하여 설치하였고, Bracket설치로 인하여 수직재 파단에는 거의 영향이 없다는 점을 명백하게 밝혀 주었다. 마지막으로 鑑定團은 聖水大橋 붕괴원인에 대하여 여러가지 시험과 측정결과를 분석한 상세한 내용의 조사보고서를 작성하여 제출함으로써 가로보의 규격미달, 용접부분의 심한 불량施工등 施工부실이 聖水大橋 붕괴의 근본적이고, 직접적인 원인이라는 사실을 밝혀내어 공소維持에 결정적으로 기여하였다고 할 수 있다.



행정안전부
국가기록원

5. 鑑定團 活動의 評價

鑑定團이 구성되어 수사과정에서 聖水大橋 붕괴원인에 관한 高度의 技術的인 事項에 대하여 상세히 諮問에 응하여 수사에 많은 寄與를 하고, 공판과정에서 붕괴원인에 대하여 明快하게 증언함은 물론 設計내용에 대한 상세한 構造解析, 交通量分析, 非破壞試驗, 鋼材의 強度試驗, 載荷試驗, 疲勞試驗등 여러가지 과학적인 試驗과 分析을 거쳐 상세한 내용의 조사보고서를 제출하여 公소維持에 결정적인 貢獻을 한 것은 檢察搜查 歷史上 劃期的인 일로 評價될 수 있다.

또한, 앞으로 고도의 기술적인 지식을 요하는 이와같은 대형사고가 발생할 경우에도 수사과정에서 전문지식을 활용할 수 있는 토대를 마련한 것으로 볼 수 있을 뿐만아니라, 교량건설등과 관련하여 設計·施工·維持管理등에 여러가지 문제점을 지적함으로써 앞으로 不實施工등으로 인한 大型事故의 발생을 방지하는데에도 지대한 공헌을 할 것으로 보아야 할 것이다.

특히 이번 사고이후 建設交通部에서 改正하려는 道路橋標準示方書 개정내용에 종전에 알지 못하였던 많은 未備點을 보완할 수 있게 된 것은 수사목적 이외에도 鑑定團의 활동이 매우 긍정적으로 평가받을 만한 부분이라 할 것이다.

다만, 鑑定團 활동이 원래 계획하였던 일정보다 약2개월간 연장되어 종결된 점과 예산이 충분치 아니하고, 공판과 관련되어 활동기간이 너무 촉박하여 보다 더 많은 시험을 충분하게 거치지 못한 점은 아쉬운 부분이라 하겠다.

원래 감정단은 1994. 11. 1.부터 1995. 1. 31.까지 활동기간 3개월 예정으로 발족하였으나, 실제로는 계획일정보다 약2개월 연장되어 활동을 마치게 되었다. 사고현장의 작업대 설치와 피로시험과정에서의 시편제작이 지연된데 그 주된 이유가 있었다. 먼저 활동개시 당시 성수대교 사고현장은 거대한 철구조물로서 출입을 위한 작업대가 설치되지 않으면 현장출입 및 정밀한 측정, 조

사를 할 수 없는 상태로서 현장조사를 위한 작업대설치가 가장 시급한 문제였고, 서울시에서 1994. 11.초순경까지 작업대를 설치하기로 예정되어 있었으나, 서울시 내부사정으로 인하여 약1개월이 지연된 1994. 12. 7.경에야 수직재가 있는 8개소부분에 작업대가 설치되어 그때부터 사고현장에 대한 비파괴촬영등 시험을 실시하게 되었고, 동월 14.경까지 수직재파단부분11개(1개당 약 500Kg)를 수거할 수 있었다. 그 후 재료시험을 하기 위하여 경북 포항시에 소재한 산업과학기술연구소로 수거한 파단부분을 수송하여 동월 말까지 재료시험을 하였으며, 다시 동 시험결과를 사용하여 대전시 대덕연구단지내에 있는 한국기계연구원에서 성수대교에 사용된 강재와 같은 시험편을 제작하여 피로시험을 하게 되었는데, 성수대교에 사용된 강재와 동질의 강재는 이미 생산이 중단되어 그 당시의 생산업체인 포항제철에 특별히 주문하여 공급받고, 이를 사용하여 시험편을 제작하는 과정에서 약1개월가량 시간이 지연되었다.

이러한 시행착오는 앞으로 유사한 사례가 발생하였을 경우 충분히 고려되어야 할 문제점이라 할 것이다.

第 2 編 鑑定團의 鑑定報告



행정안전부
국가기록원



행정안전부
국가기록원

제 출 문

서울지방검찰청 검사장 귀하

귀청에서 본 감정단에 의뢰한 “성수대교 붕괴사고 원인규명”에 대한 최종 조사보고서를 제출합니다.



행정안전부
국가기록원
1995년 4월

성수대교 붕괴사고 원인규명 감정단 단장 안치섭

단원 장석윤

조효남

장승필

성천경

장봉중

간사 방명석

감 정 단 원 :

성 명	근 무 처	경 력	비 고
안 치 섭	(주)우대기술단 회장	· 서울대 공대 · 고등고시기술과(토목) 합격 · 토목구조기술사 · 구조기술사회 회장 · 도로교 시방서 개정 위원장 · 서울지법 민사조정위원	단 장
장 석 윤	서울시립대 교수	· 한양대 공대 · 고려대학교 공학박사	
조 효 남	한양대 교수	· 육군사관학교 · 미국 Michigan대학 공학박사	
장 승 필	서울대 교수	· 서울대 공대 · 독일 Stuttgart대학 공학박사	
방 명 석	한국건설기술연구원 구조연구실장	· 서울대 공대 · 토목구조기술사 · 과학기술원 공학박사	간 사
성 천 경	(주)유신설계공단 기술연구소장	· 서울대 공대 · 토목구조기술사 · 미국 Lehigh 대학 공학박사	
장 봉 증	(사)한국선급 검사관	· 부산대 공대 · 비파괴(초음파·방사선) 기사 1급	

1. 서 론

1-1 개 요

서울 성동구 성수동과 강남구 압구정동을 연결하는 성수대교의 10번과 11번 교각사이의 상부구조가 붕괴 낙교되어 많은 인명과 재산피해를 야기시킨 사고는 지난 몇 년사이에 비약적으로 발전해 온 우리 건설기술계에 많은 충격을 안겨주었다. 성수대교는 구조형식이 게르버 트러스 교량으로서 주경간부의 앵커트러스와 핀으로 연결된 48m의 중앙 현수지간을 갖는 지간장 120m의 장대교량이다. 이러한 구조적 형식은 60년대 이전에는 많이 사용되었지만 구조적 여유성(Structural Redundancy)이 비교적 적은 구조형식이다.

그러나 성수대교는 그 당시 트러스교로서의 미관도 고려하고, 한강에 설치된 교량중 구조형식의 특이성을 감안한 용접 트러스교로서는 최초의 교량이 된 셈이다. 당시의 우리의 제작 기술로는 이러한 특수형식 장대교량의 완벽한 제작이 어려운 상황임에도 불구하고 과감하게 이 방식을 채택하였으나 일반 교량 공사와 같은 의식과 기술수준으로 시공과정에서 실제적인 감리제도가 없는 상황하에 건설되었으며, 실질적인 유지관리가 이루어지지 못함으로써 준공 15년만에 붕괴되는 참사를 야기시키게 되었다.

그뿐만 아니라 성수대교 붕괴의 근원적인 배경은 성수대교의 건설과 관련된 기술적인 면, 건설제도 및 행정의 불합리성과 교량건설의 계획에서 설계, 시공, 감리 및 유지관리 전반에 걸쳐 불합리한 제도와 관행들이다.

따라서 붕괴시의 현황, 설계, 시공, 감리, 유지관리, 보수 등 직접적인 기술 관련 사항과 건설행정에 관련된 기획, 예산, 도급 등 제도 관련사항 등을 검토하고, 붕괴된 교량에 대한 몇가지 시험과 분석을 실시하여 객관적이고 정확한 원인을 규명하여 그 책임소재를 밝히고 향후 유사한 사고의 예방과

유지관리 및 보수에 활용할 수 있는 자료를 제공하기 위하여 본 감정 보고서를 작성한다.

1-2 교량 연혁

본 교량은 강북의 성동구 성수동 뚝도 수원지 앞에서 강남구 압구정동 현대아파트 앞을 연결하는 한강의 11번째 교량으로, 1976년 당시 정부의 강력한 경제개발 정책과 강남 개발에 따라 급속한 교통 수요를 충족시키기 위하여 성산대교와 거의 같은 시기에 계획되어 1976년 부터 1977년 까지 수개월간 (주)대한콘설턴트가 설계한 교량이다. 당시 구조형식은 게르버 트러스(Gerber Truss)로 신공법은 아니나, 제작은 과거 리벳(Rivet) 접합 방식이 아닌 용접과 고장력 볼트(마찰 접합) 접합 방식에 의한 신공법을 채택하여 1977년 4월 동아건설산업주식회사 도급으로 1979년 10월까지 2년 6개월의 짧은 기간에 완공·개통된 교량으로, 미관을 중시한 결과 당시 우리의 시공 기술로서는 다소 무리인 경간 120m의 상로 트러스 용접교로 2년 6개월의 초단기 완공의 새로운 기록과 성산대교와 함께 국산 자재·국내 기술로 시공된 최초의 장대 용접교이다.

1-3 당시 건설행정 현황

최근 몇년 사이에 발생한 각종 구조물의 대형 붕괴사고를 야기시킨 근원적인 배경은 무엇보다도 건설 주무부서의 불합리한 건설행정에서 찾을 수 있다.

특히, 성수대교의 경우는 교량 가설 당시인 70년대 중·후반기에 중화학공업 육성 등의 고도 경제성장 정책 즉, 개발 성장주도형 정책에 따라 도로, 항만, 댐, 발전소 등의 국가 간접자본시설의 확충에 주력하던 시기로서 중동 지역 등 해외 건설경기로 경제는 더욱 급성장하게 되었다. 이러한 상황에서 건설공사 수주를 위한 과다경쟁으로 품질관리를 위한 합리적인 제도와

법규, 입찰, 시공, 감리, 준공검사에 이르기까지 제반건설 행정은 체계적이고 합리적인 제도로 정착되지 못한 때였다.

당시 건설행정 체계로 서울특별시의 경우 도시계획국, 건설국과 수도국(하수도국, 상수도국)에서 기획, 설계, 집행, 감독, 유지관리 및 보수까지 서울시의 모든 건설을 총괄 관장하는 체계였으며, 현재와 같이 기능별로 분리(기획, 집행, 유지관리)되어 있지 않았다. 구청과 사업소는 극히 제한적으로 소규모 공사만 담당하였다.

당시의 건설행정은 종합기획 및 장기간의 검토를 거친 장기계획에 의한 체계적인 건설보다는 그때 그때의 수요에 맞추는 다소 즉흥적인 면과 고위층의 의사에 부응하는 즉, 하향식 행정관행이 건설기술에도 그대로 적용되고 있었다. 시설물 건설 과정을 살펴보면, 기획에서 사업이 결정되면 예산을 요구하여 설계예산을 확보하고 설계를 의뢰하게 된다. 그러나 설계자의 의견보다는 집행관의 의지 및 의견에 따라 구조물의 특징이 결정되는 경우가 많았으며 설계가 완료되면 건설업체에 의하여 공사를 도급으로 시공하게 된다. 도급자 선정은 형식적인 요건만 갖추면 전문 기술 보유 유무를 불문하고 무조건 최저 가격으로 결정되며, 건설업체도 기술능력이나 장비 등 실질적인 책임감보다는 수주부터 해놓고 보는 비정상적인 건설행태가 성행하던 시기였다. 공사가 착공되면 대형공사에서는 2인, 일반공사에서는 1인의 공무원이 공사감독이란 직책으로 시공감리를 전담하며, 시공시에 기술상 어려운 문제를 해결하기 위한 감리 및 자문제도는 없었다.

따라서 특수분야의 시공감리는 사실상 거의 이루어지지 않고, 시공자에 일임하다시피 되어 있었다. 유지관리 및 보수에 관해서는 서울시의 대형도로 구조물의 경우 건설국 도로과 보수계에서 전담하였으나 전문기술자가 없을 뿐 아니라 인원, 예산 또한 턱없이 부족한 실정으로 외부 전문가의 자문을 구할 수도 없는 것이 당시 유지관리 체계였다.

1-4 당시 교량 건설 기술현황

교량은 사용재료에 따라 강교량과 콘크리트 교량으로 대별할 수 있으나 여기서는 강교량에 대한 기술현황을 살펴보기로 한다.

우리나라 강교량은 대부분 일본사람에 의하여 몇몇 장대교가 일제시대에 건설되었으며, 6.25이후 전후 복구시 미공병단에 의하여 건설되었다. 미공병단에 의한 강교 복구 건설은 대부분 철도교(한강, 낙동강, 금강 등)이고 도로교는 우리나라 기술진에 의하여 한강인도교(아치교)복구가 있었다. 그외 몇몇 강교량이 건설되었으나, 판형교이며 이때까지 모든 교량들은 모두 리벳(Rivet)접합 교량이다.

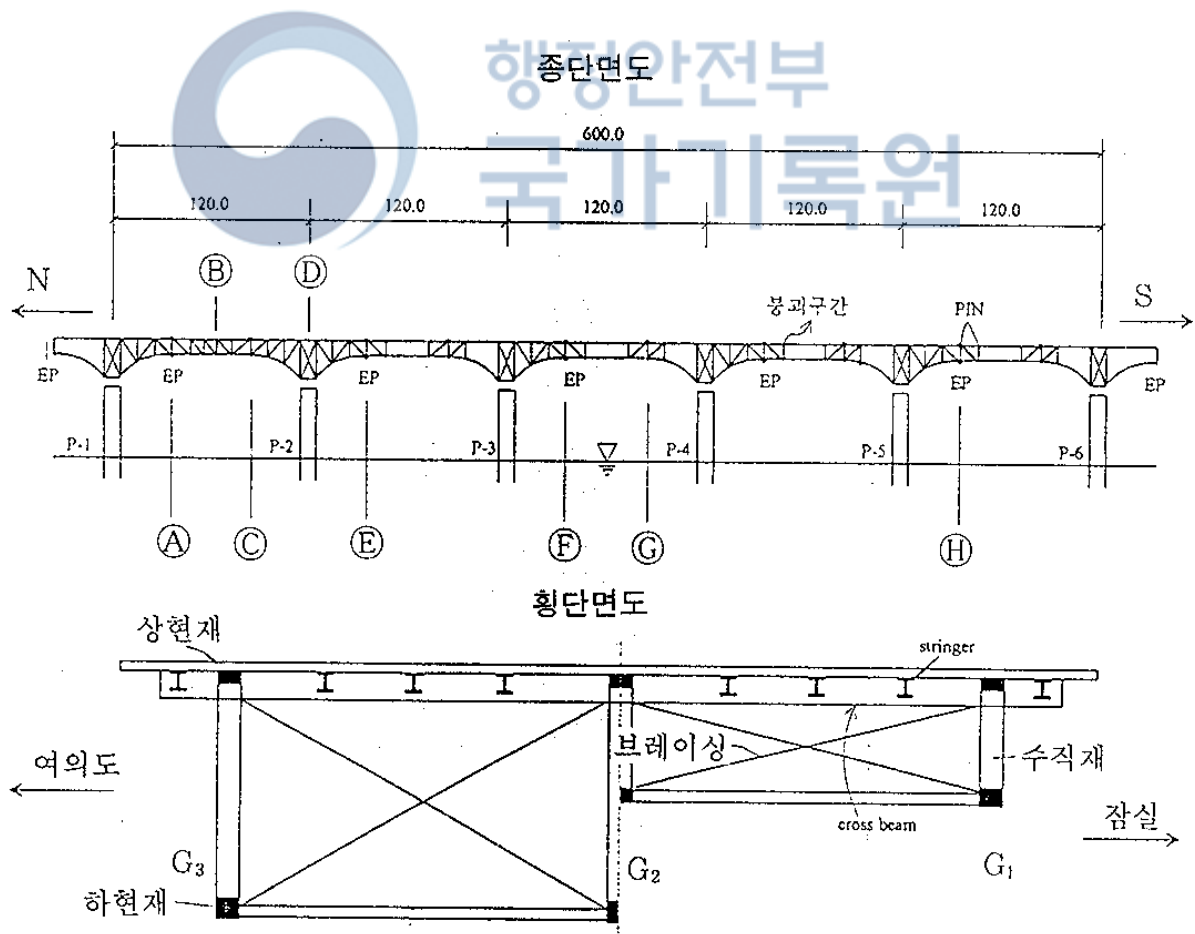
1960년 후반에 들어 경제개발에 따른 사회 간접자본의 급속한 팽창에 힘입어 강교의 가설이 증가하기 시작했다. 즉, 청계천 고가도로, 경부고속도로상의 장대교(금강 1,3,4교, 낙동강 등), 서울의 영동대교, 잠실대교 등 용접강교량이 건설되었다. 그러나 위 교량들은 우리나라 용접 도로교 시방서 제정 전으로 외국의 설계 기법을 그대로 도입하여 설계하였고, 자제도 외국자재에 주 구조는 외국에서 용접하여 도입하였고, 국내에서는 조립가설만 하였다.

1970년대 초반, 대형 조선소들이 일본과 영국 등의 기술지도로 용접기술의 보급향상과 해외건설이 활발해지면서 건설회사도 강교제작 공장을 설립, 용접교의 제작을 시작할 초기에 돌입하였으며, 일본 용접도로교 시방서를 본따 우리의 용접강도로교 시방서를 제정하는 등 용접교 제작에 따른 기술, 즉, 제작자의 노하우인 제작 요령서, 제작 정밀도 기준 등은 거의 없었고, 더욱이 용접교량의 제작 경험 부족에 의한 시행착오와 검사요원, 방법, 장비 등의 부족은 물론 그 숙련도나 기술축적이 부족한 상태였다. 따라서 당시 강교건설은 제한된 시설과 부족한 기술인력(기술자, 기능공)으로 보아 충분한 시간과 공사비를 투자하여 기술을 개발하면서, 건설을 수행했어야 할 시기였다.

2. 교량 외관 조사

2-1 개 요

교량 외관 조사는 붕괴된 현황, 붕괴구간의 파괴된 부재 단면, 붕괴되지 않은 구간의 유사한 수직재를 중심으로 실시하였다. 중점 조사대상은 파단면 상태, 용접 부위의 균열 및 부식 상태, 유지관리를 위한 부착물 등을 육안으로 조사하였으며 비파괴시험 등과 같은 정밀조사 및 시험은 3장에 수록하였다. 조사 위치는 비계를 설치하여 접근이 가능한 부위만 시행하였다(그림 2-1).

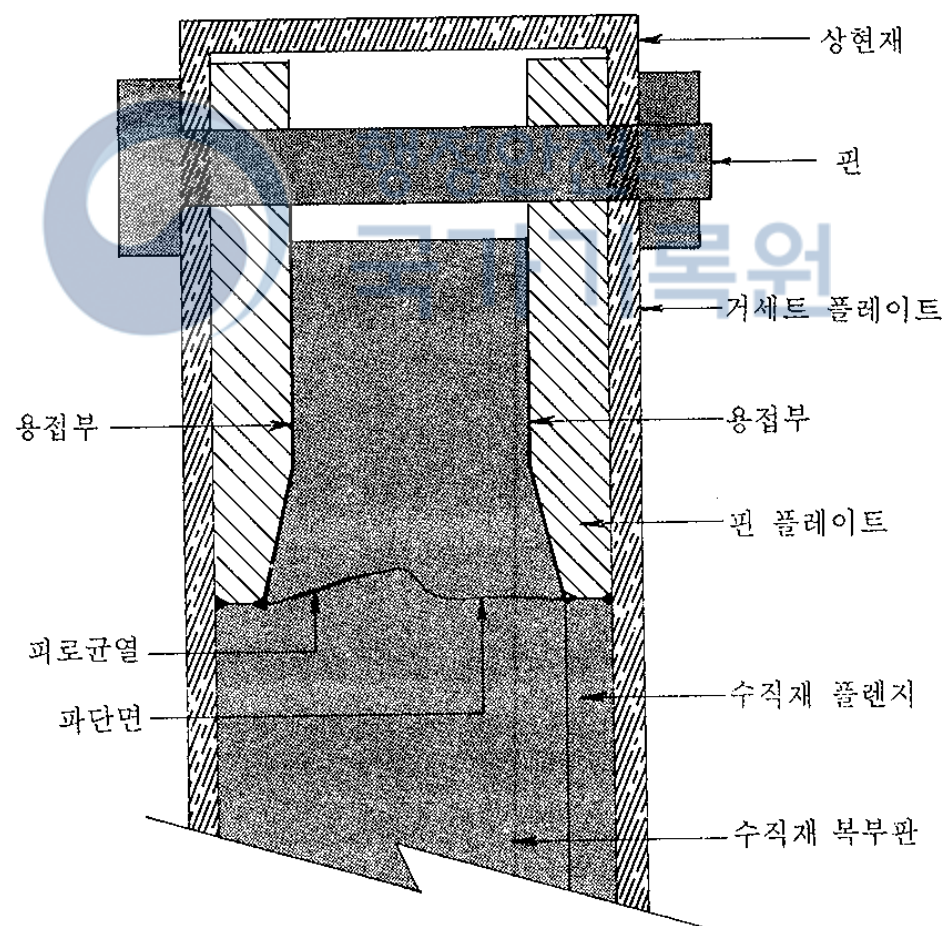


(그림 2-1) 외관조사 위치

2-2 붕괴 현황 조사

2-2-1 교량의 파괴 상태

10번과 11번 교각 사이의 현수트러스의 편연결 수직재의 용접부가 파단되어, 현수트러스 부분이 낙교되어 있는 상태이다. 편연결부의 상세는(그림 2-2)와 같다.



〈그림 2-2 편연결부의 상세도〉



〈사진 2-1〉 붕괴현황

2-2-2 파단면 조사

수직재의 편 연결부는 플렌지 두께가 51 mm와 18 mm의 용접 부위가 파단되어 붕괴가 일어났다. 파단면에서 붕괴 전 용접 부위가 일부 파단된 상태로 보이는 부분은 녹이 심할 뿐 아니라 일부는 재도장시 페인트가 스며 있다. 용접 방법도 설계대로 X형 맞댐용접이 아니고 모재를 모따기도 하지 않은 채 필렛용접이음을 하여 용접의 두께가 부족할 뿐 아니라, 용접도 제대로 되어 있지 않았다.



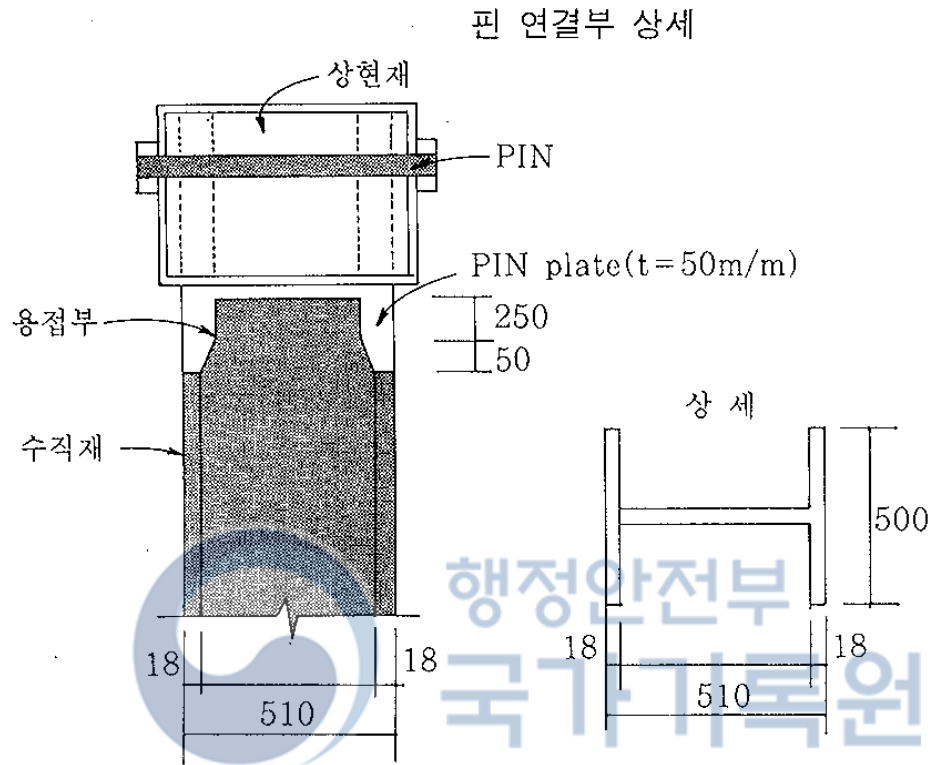
〈사진 2-2〉 수직재 파단면

2-3 외관 조사

2-3-1 일반사항

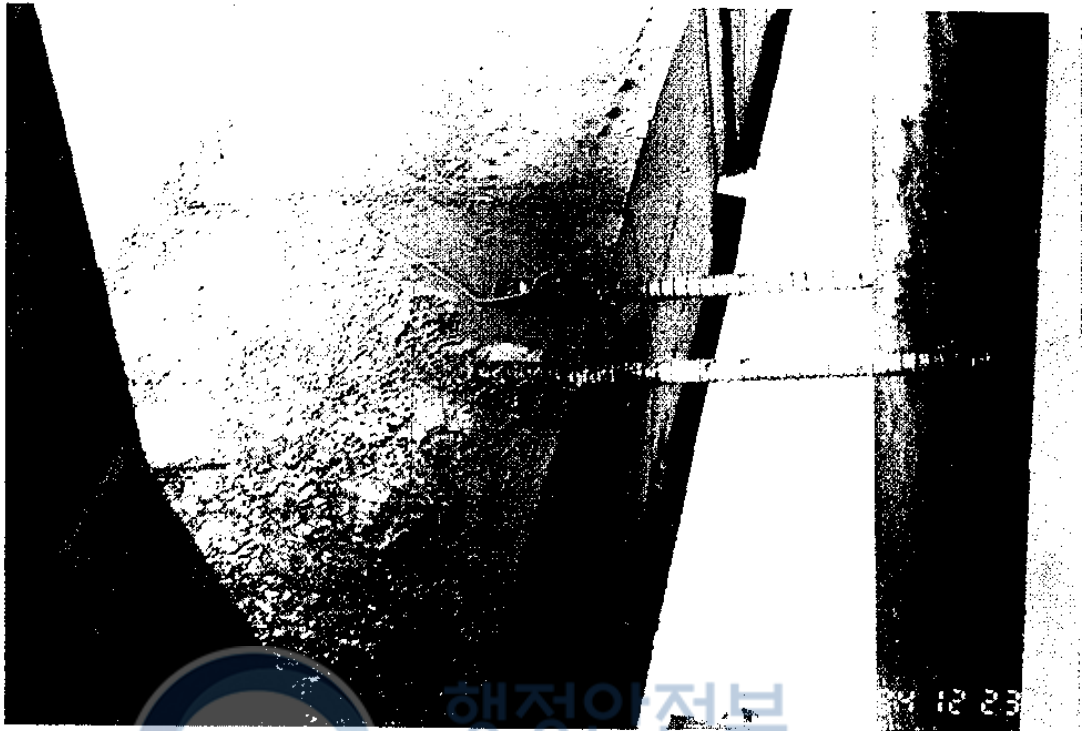
- 외관조사는 (그림2-1)과 같이 비계가 설치되어 있는 8개소에 대하여 실시하였다.
- 하현재의 수평브레이싱 접합부(1개부재 : 양단)에 12개의 볼트가 사용되어야 하나 전체적으로 4~8개만 연결되어 있고, 수직브레이싱도 길이가 짧아 현장에서 볼트구멍을 재 천공하여 연결한 것으로 판단된다.
- 전반적으로 신축이음부의 부식정도가 심하다.
- 부재의 연결부 상태가 불량하다(예, 볼트 소요수량 6개중 실제 4개 연결).
〈사진 2-4〉
- 신축이음부의 일부 가로보에 균열이 발생되어 있다.
- 주트러스 사이의 간격이 설계치보다 큰 것으로 판단된다.
- 가로보와 세로보의 이음부 상태가 불량하고, 이음부에 복부 균열이 발생한 곳이 있으며 철근 등을 덧붙여 용접한 곳이 많다.
- 붕괴되지 않은 부분도 수직재의 용접부에 균열이 발생되어 있다.
- 신축이음부의 일부 수직재에 보수용으로 보이는 부속물(속칭 “까치발”과 보조수직재의 지지구조물)이 있다.

가. ㉠-단면 (신축이음 설치부)

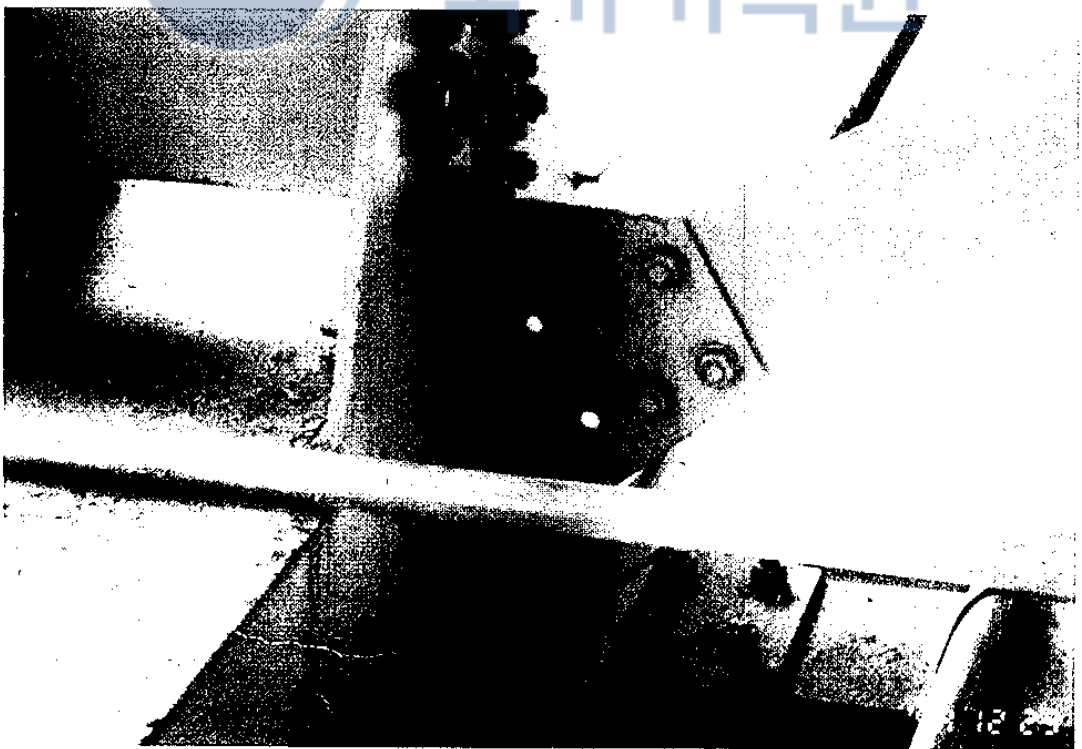


〈그림 2-3〉 핀연결부의 상세도

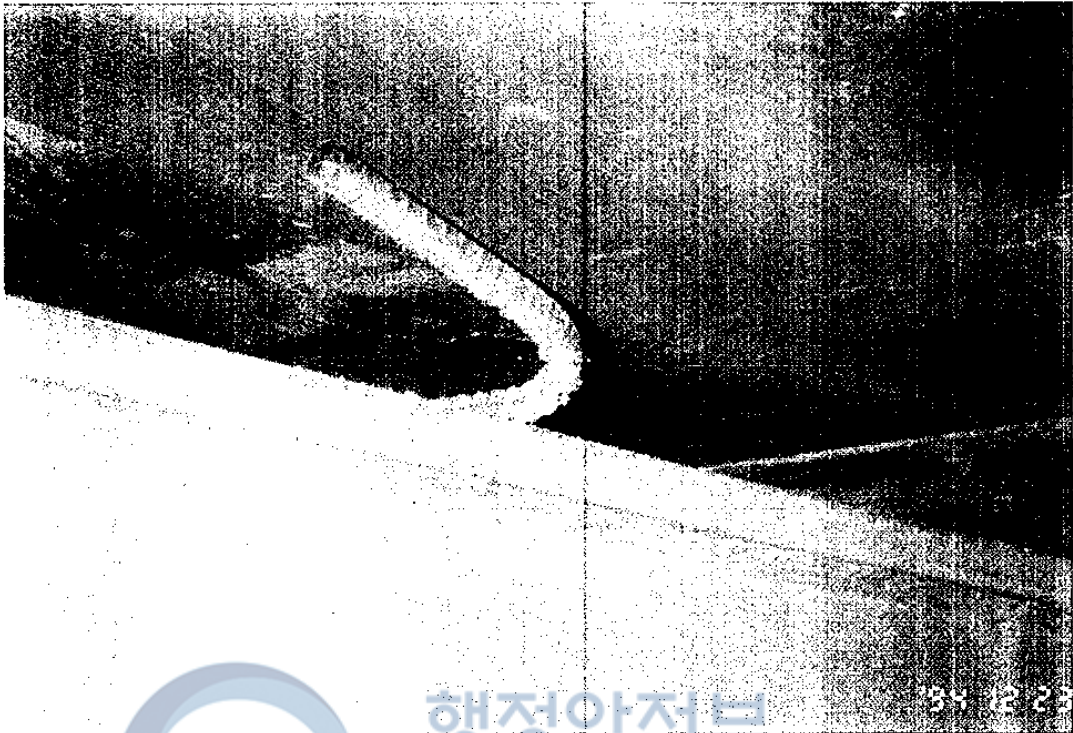
- 상현재의 부식이 심하다<사진 2-3 참조>.
- 하현재(G3)에 일부좌굴이 발생하였다.
- 브레이싱의 연결상태가 불량하다<사진 2-4 참조>.
- 상현재와 세로보에 전단연결재가 70cm 간격으로 설치되었으나 바닥판 콘크리트와 연결이 되어있지 않다<사진 2-5 참조>.



〈사진 2-3〉 상현재의 부식



〈사진 2-4〉 브레이싱 연결볼트의 탈락

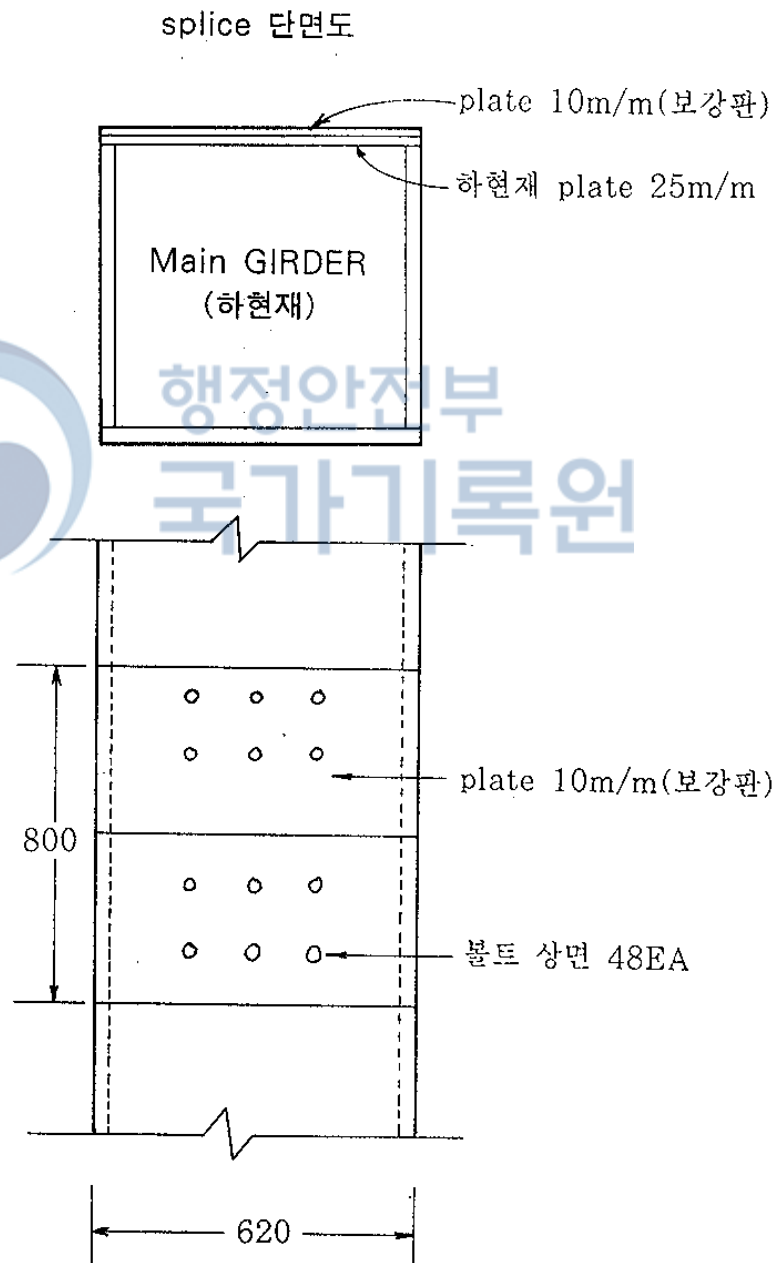


〈사진 2-5〉 전단연결재 설치 상태

행정안전부
국가기록원

나. ㉔-단면

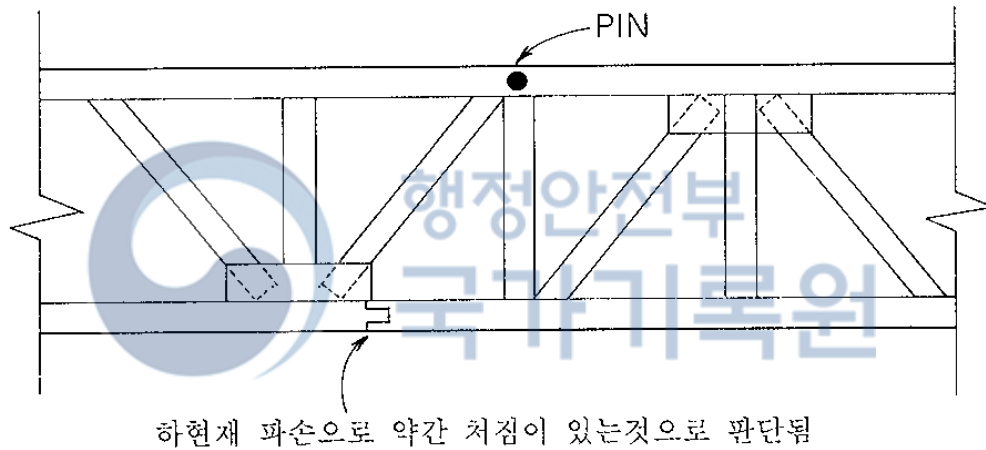
- 외관상태는 대체로 양호하다.
- 하현재(G1)의 연결부에서 일부 변형이 보이나 별다른 문제점은 발견하지 못하였다.



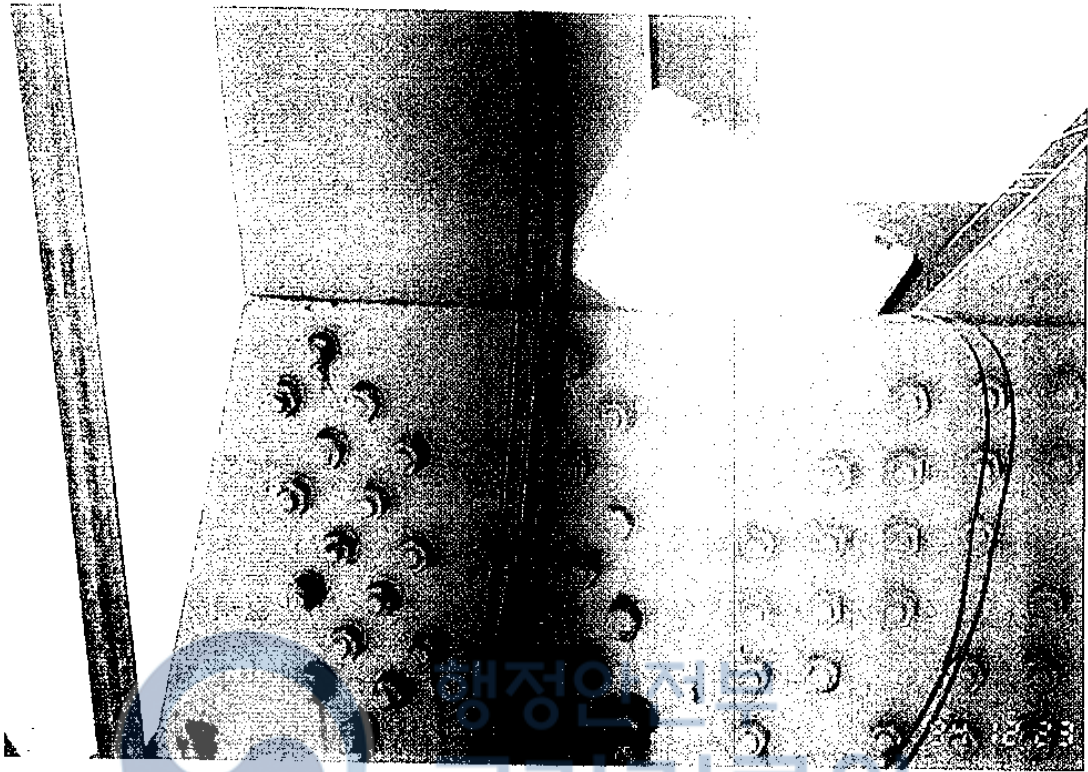
〈그림 2-4〉 하현재의 단면 및 연결부

다. ©-단 면

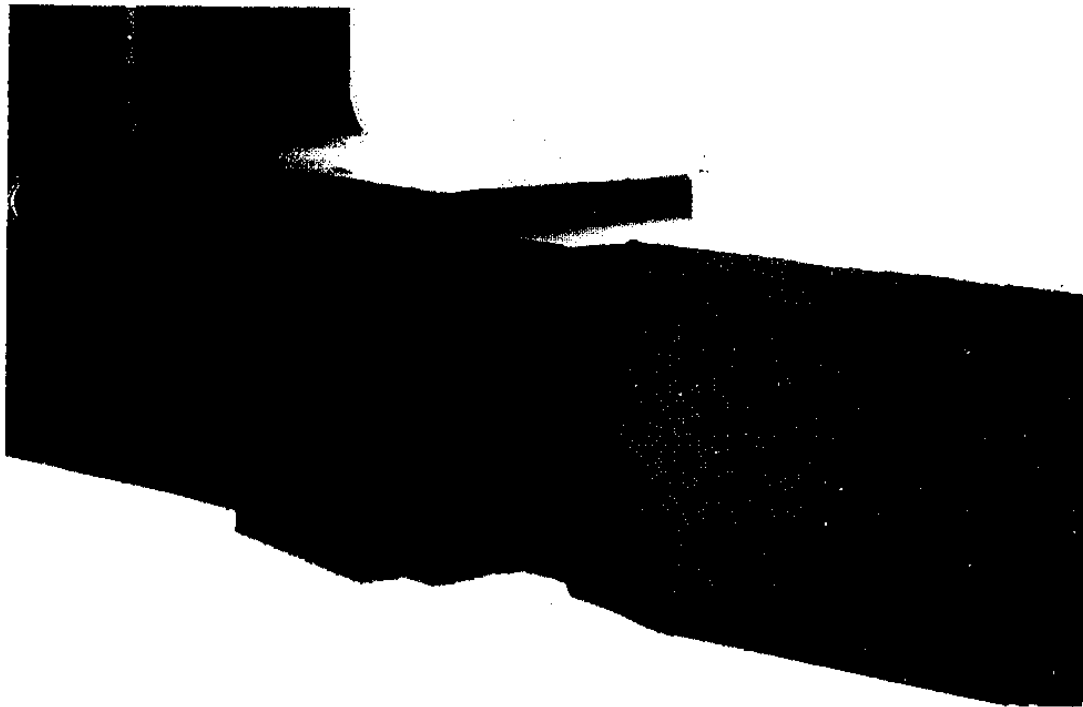
- 수직재와 하현재(G3)의 연결부에서 내·외측의 연결볼트 36개중에서 7개가 부식되고 풀려 있다<사진 2-6 참조>.
- 위와 같은 원인으로 하현재 sliding받침부에 처짐이 발생되었다.
<사진 2-7 참조>
- 대체적으로 볼트연결부 상태가 불량하다.



(그림 2-5) sliding 연결부의 처짐



〈사진 2-6〉하현재 연결볼트의 부식 및 풀림



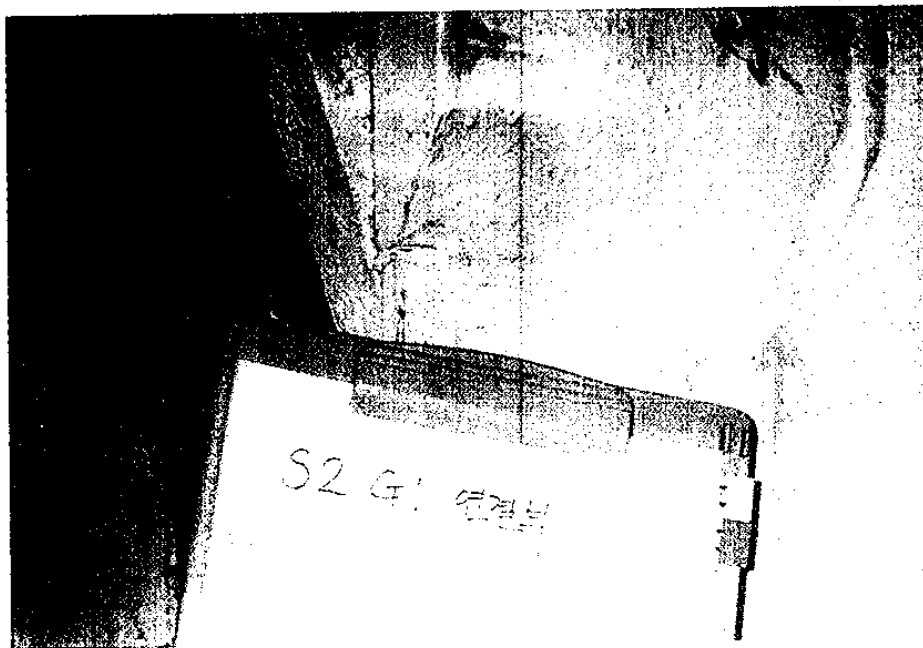
〈사진 2-7〉sliding 연결부의 처짐

라. ㉔-단면 (2번 교각부)

- 용접부가 대체로 불량하나 특별한 손상은 없다.

마. ㉕-단면(신축이음부)

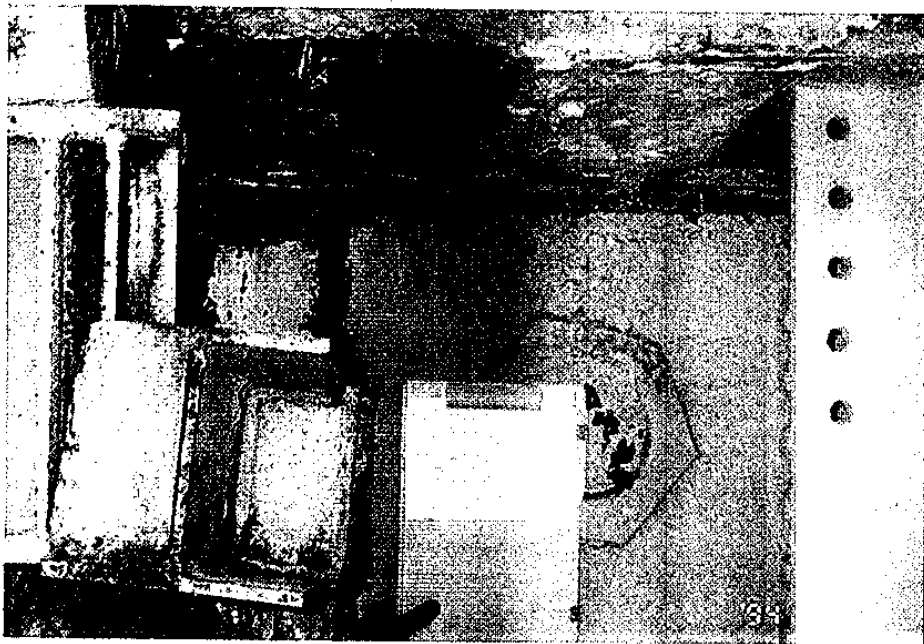
- 수직재의 용접부에 균열이 발생되었다(G1부분)〈사진 2-8 참조〉.
- 상현재(G1, G2)와 가로보의 연결부가 파손되었다〈사진 2-9 참조〉.
- “까치발”이 설치되어 있다〈사진 2-10 참조〉.
- 가로보의 연결부 파손으로 H형강을 사용하여 보강하였다〈사진 2-11 참조〉.
- 강재의 부식상태가 심하다.
- 볼트의 연단거리가 부족한 연결부가 일부 있다〈사진 2-12 참조〉.
- 하현재(G1, G3)의 sliding받침이 이탈되어 있는 상태이다〈사진 2-13 참조〉.
- 세로보(stringer)와 가로보의 연결부가 이탈되어 있다.
- 전체적으로 상태는 매우 불량하며 낙교 위험도 있는 것으로 판단된다.
- 주트러스(G1)의 신축이음부에 단차(5cm)가 발생되었다〈사진 2-13 참조〉.



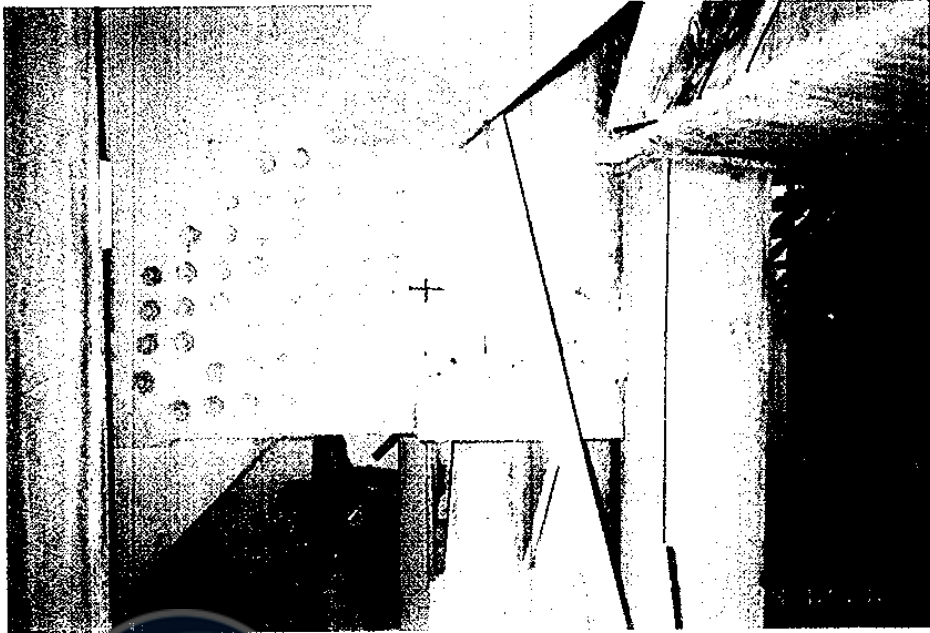
〈사진 2-8〉 수직재 용접부의 균열



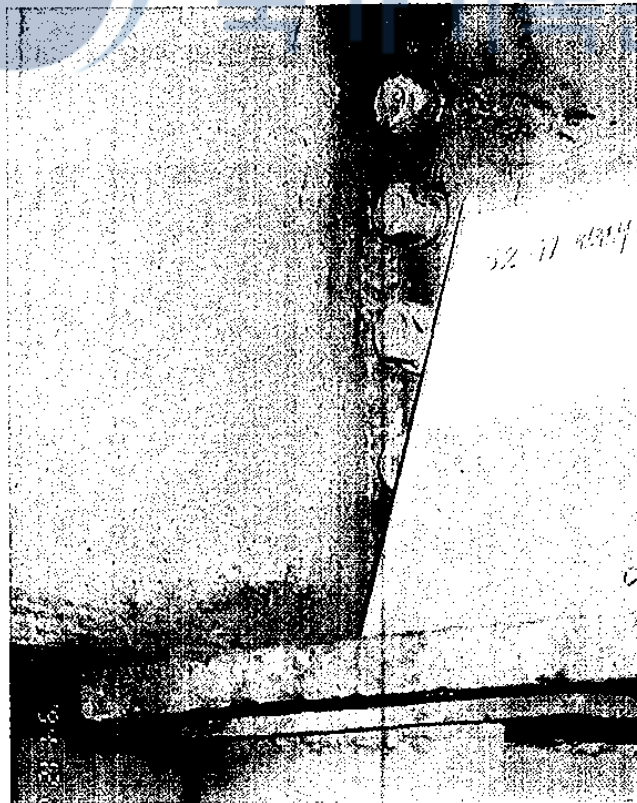
〈사진 2-9〉 상현재와 가로보의 연결부 파손



〈사진 2-10〉 까치발 설치 상태



〈사진 2-11〉 가로보 지지를 위한 H형강 보강상태



〈사진 2-12〉 볼트 연단거리 부족 및 용접부 부식



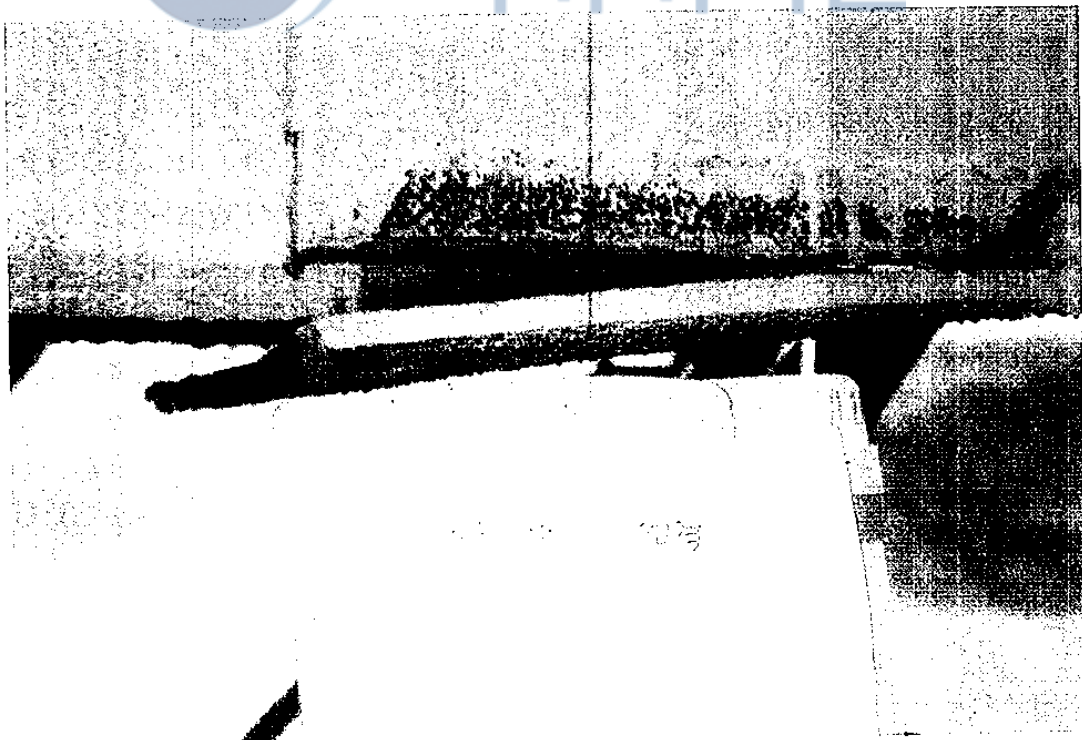
〈사진 2-13〉 sliding 받침 이탈 및 처짐

바. ㉔-단면(신축 이음부)

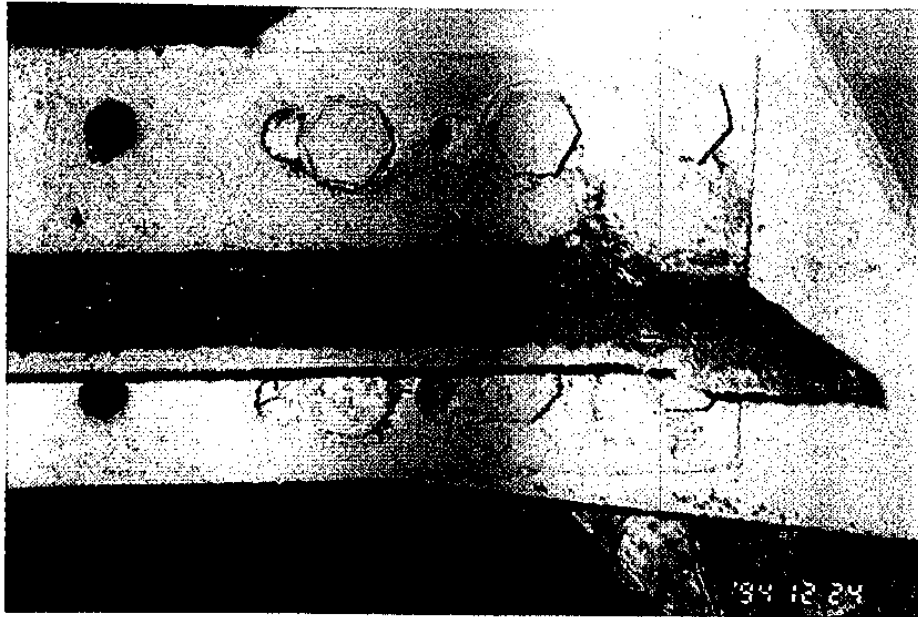
- 상현재와 가로보의 연결부에서 볼트 이탈과 가로보에 균열이 심하게 발달되어 있다〈사진 2-14 참조〉.
- 상현재(G3)의 sliding연결부가 파손되어 있다〈사진 2-15 참조〉.
- 수직재의 용접부에 균열이 발생되어 있다.
- 브레이싱의 연결부 볼트구멍이 현장천공이 되어 있다〈사진 2-16 참조〉.



〈사진 2-14〉 가로보의 균열



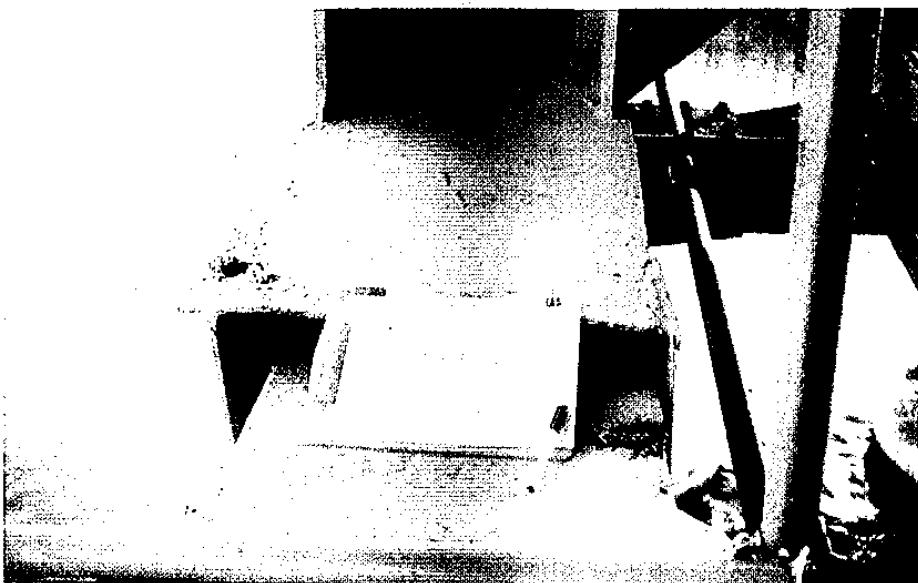
〈사진 2-15〉 sliding 연결 파손



〈사진 2-16〉 연결부 볼트구멍의 천공불량

사. ㉔-단면

- 하현재의 sliding연결부가 파손되어 처짐이 발생하였다〈사진 2-17 참조〉.
- 바닥판콘크리트에 균열이 발생되었다.
- 상현재와 가로보의 연결부에 균열이 발생하였다〈사진 2-18 참조〉.



〈사진 2-17〉 sliding 연결부 파손



〈사진 2-18〉 상현재와 가로보의 연결 파손

아. ㉠-단면(신축 이음부)

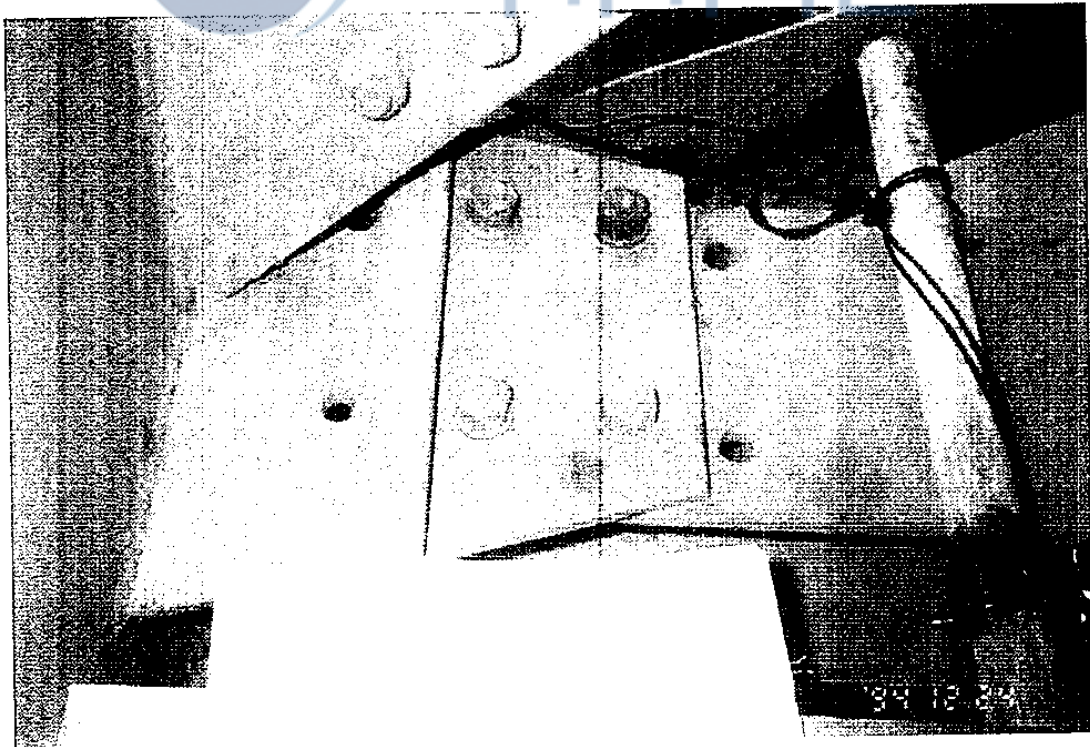
- 바닥판(켄틸레버부) 콘크리트에 철근이 노출되어 있다<사진 2-19 참조>.
- 바닥판의 신축이음부 콘크리트가 파손 및 침하되어 있다<사진 2-20 참조>.
- 횡브레이싱의 연결볼트가 탈락되어 있다<사진 2-22 참조>.
- 브레이싱의 좌굴이 발생하였다.
- 브레이싱의 연결상태가 불량하다.
- 상현재와 가로보의 연결부에 볼트의 탈락 및 부식이 심하다<사진 2-21 참조>.
- 수직재에 까치발이 설치되어 있다<사진 2-23 참조>.



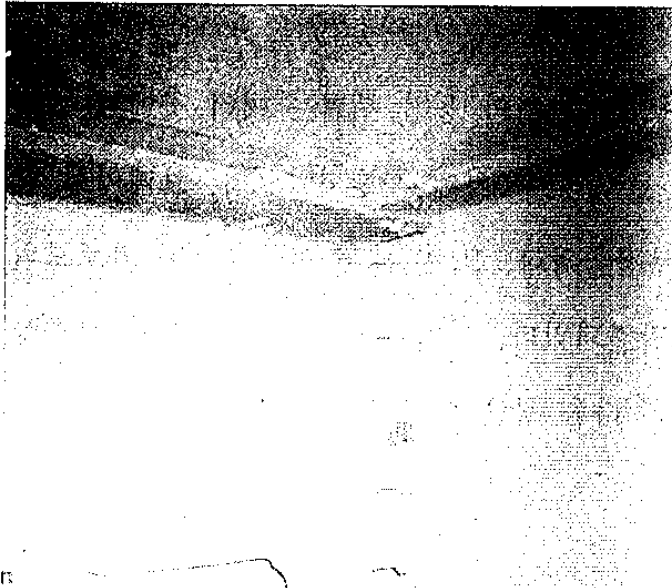
<사진 2-19> 바닥판 철근 노출



〈사진 2-20〉 바닥판 콘크리트 파손 및 침하



〈사진 2-21〉 볼트 탈락



〈사진 2-22〉 가로보 연결부 볼트 탈락



〈사진 2-23〉 까치발 설치 모양

2-4 문제점

본 교량의 외관 조사 결과, 편 연결 수직재의 용접 부위는 여러 곳에서 균열이 발생하였고, 가로보의 연결부 보수가 수 차례 시행되었으며, 브레이싱 연결 볼트의 수와 볼트구멍 등도 부정확하다. 또한 신축 이음장치와 가로보의 보수를 위해서 설치된 까치발이 발견되었다. 이러한 구조물의 손상과 부속물 설치가 교량의 붕괴에 미친 영향은 다음 장에 수록하였다.



행정안전부
국가기록원

3. 비파괴시험

3-1 개 요

비파괴시험은 인장시험이나 충격시험과 같은 파괴시험과는 달리 시험하고자 하는 제품을 파괴하지 않고 시험할 수 있는 물리적인 시험방법으로서, 물질고유의 물리적성질이 재료내의 조직상의 이상, 기하학적 불연속등의 결함에 의해 변화 하는 현상을 이용하여 건전한 부위와 결함부위의 물리적 성질을 비교하고 그 차이에서 결함의 양상을 추정하는 기술이다.

이러한 비파괴검사 기술은 공업의 기술적 합리화를 위해 공업용 원재료의 품질 검사, 제조공정의 품질관리, 제품의 사용에 있어서의 신뢰성 보장 및 보수검사의 수단으로 사용된다. 특히 제품 또는 시설등의 사용중에 위험한 결함의 발생 여부를 정기적으로 점검함으로써 불의의 사고에 의한 원가상승과 재난을 미연에 방지하는 수단으로 유용하게 사용될 수 있다.

이러한 비파괴검사 기술의 특성상 본 성수대교 붕괴사고 원인 조사활동에 있어서 비파괴검사분야는 상당히 중요한 위치를 차지하고 있는 것으로 생각된다. 즉 수직재 파단부분에서 확인된 불완전 용접상태가 파단부분에만 국한된 제한된 현상인지 아니면 전체적으로 일관되게 나타난 현상인지를 확인하는 것은 용접 시공품질에 대하여 전체적으로 조감해 볼 수 있는 기회를 제공한다. 즉, 비파괴시험 결과로 성수대교 붕괴사고의 원인을 직접적으로 확인할 수 있는 것은 아니지만, 전반적인 용접품질의 확인에 의해 배경자료로 사용될 수 있다. 뿐만 아니라 비파괴시험 결과 확인된 각종 용접조건은 향후 파괴시험 시험편을 준비하는 데 중요한 자료가 될 수 있다.

실제 비파괴시험에 있어서는 비계설치등 용접부의 접근에 문제가 있었기

때문에 수직재의 맞대기 용접이음에 대해서만 비파괴시험을 실시하고 하현재, 상현재등 수직재 이외의 중요한 부재의 맞대기용접 이음에 대하여 용접시공품질을 확인하지 못한 아쉬운 점이 있었으나, 붕괴사고 원인과는 직접적인 관련이 없었다는 사실로 아쉬움을 달랠 수 밖에 없었다.

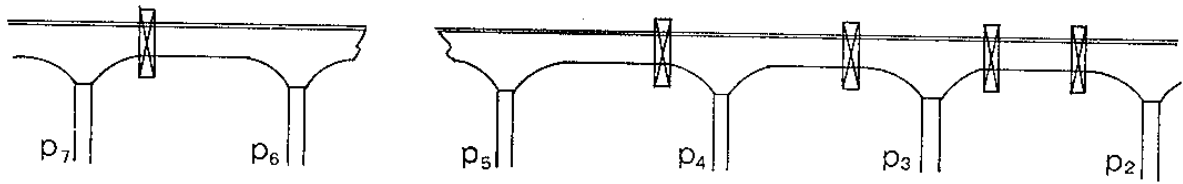
본 장에서는 비파괴시험 방법중 방사선투과탐상시험 및 초음파탐상시험을 통하여 확인된 용접결함의 종류와 용접결함의 종류별 발생빈도 및 물리적인 용접시공 조건등을 조사한 결과를 고찰하여 전반적인 용접시공 상태를 평가하고 아울러 평균적인 용접시공 조건을 선정하여 피로시험시의 시험편 제작 조건으로 제공코자 한다.

3-2 시험방법 및 내용

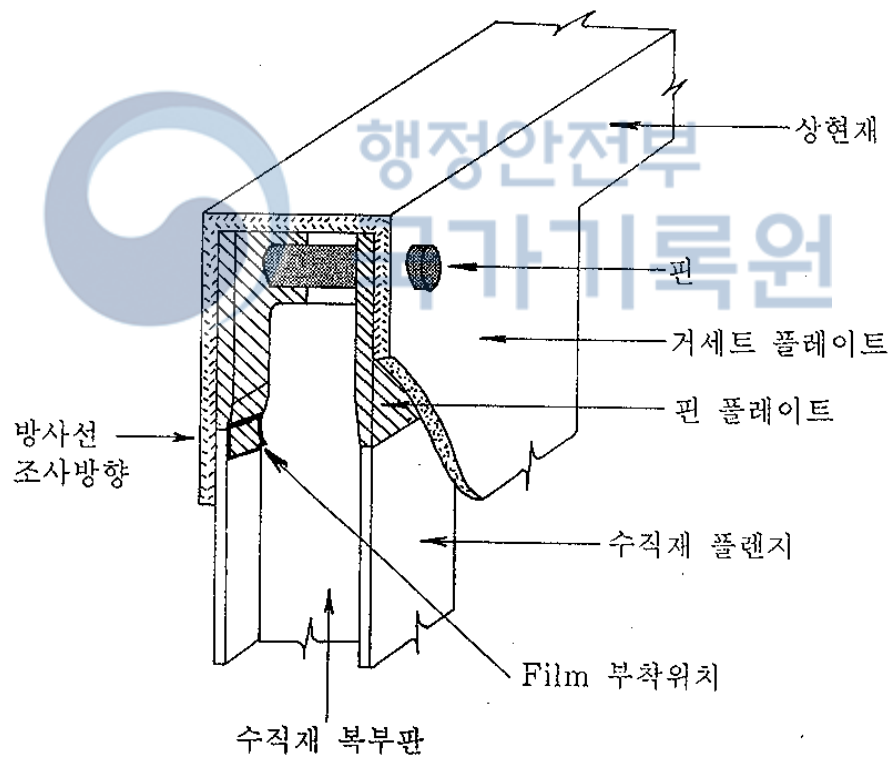
3-2-1 RT 시험

방사선투과탐상시험의 목적은 용접결함의 확인과 용접개선면의 간격을 확인하는 데 주안점을 두었으며, 접근 가능한 전체 수직재 맞대기용접 이음에 대하여 KS B0845(강용접부 방사선투과탐상시험 방법 및 등급 분류)에 따라 실시하였다. 또한 본 시험재가 인장을 받는 부분이므로 판정기준은 KS B0845의 2급을 기준으로 하였다.

촬영부위 즉 검사개소는 (그림 3-1)과 같으며, 총 111검사개소에 대하여 방사선투과탐상시험을 실시하였다. 필름의 부착 및 방사선 조사방향은 다음 (그림 3-2)와 같으며, 시험조건의 상세는 다음 (표 3-1)과 같다.



(그림 3-1) 방사선 투과시험 개소



(그림 3-2) 필름부착 및 방사선 조사방향

(표 3-1) 방사선 투과시험조건 상세

구 분	시 험 조 건	비 고
사 용 장 비	방사성동위원소Ir-192, 40Ci	초점크기 : 2.0×3.0mm
사 용 투 과 도 계	F08	스크린 : 연박0.127mm
필 림 타 입	AGFA D7	
선원-필름간거리	500mm	
촬 영 방 법	Single Wall Single View	
노 출 시 간	15분 30초	
현 상 조 건	20℃, 5분	
표 면 상 태	As Welded	

3-2-2 UT 시험

초음파탐상시험의 목적은 결함의 크기 및 용입 깊이의 확인에 주안점을 두었으며, 접근 가능한 전체 수직재 맞대기용접 이음에 대하여 KS B0896(강용접 부 방사선투과탐상시험 방법 및 등급 분류)에 따라 실시하였다. 또한 본 시험재가 인장을 받는 부분이므로 판정기준은 KS B0896의 2급을 기준으로 하였다.

촬영부위 즉 검사개소는 방사선투과시험 개소와 동일하며, 총 111검사개소에 대하여 초음파탐상시험을 실시하였다. 시험조건의 상세는 다음(표 3-2)와 같다.

(표 3-2) 초음파 탐상시험조건의 상세

구 분	시 험 조 건	비 고
사 용 장 비	EPOCH-II	S/N 94154806
탐 측 자	5Z10x10A70	교정각도 : 69.3°
시 험 방 법	Contact	
교 정 블 록	STB-A1	
접 측 매 질	Glycerin	

3-3 감정 및 고찰

3-3-1 용접결함의 종류 및 원인

본 비파괴시험에서 확인된 여러가지 용접결함의 종류 및 발생원인은 다음과 같다.

(1) 용입 부족

이 결함은 모재와 모재 사이에 용착금속이 Root부 까지 용입되지 않을 때 발생한다. 또한 이러한 결함의 발생을 방지하기 위해서는 통상 이면

에서의 Back Gouging을 실시하여야 한다. 그러나 본 수직재의 경우에는 개선을 하지 않고 표면에서만 용접을 실시하였기 때문에 일반적으로 나타나는 용입불량의 경우에 비해 그 범위가 광범위하고 용입의 깊이가 비교적 얇은 문제점을 가지고 있다. 즉 용접의 잘못에 의해 우연히 발생된 것이 아니라 근본적으로 용입불량이 발생할 수 밖에 없는 상황인 것으로 사료된다.

(2) 융합 불량

이 결함은 용접입열이 충분하지 못할 때, 모재와 용접부 사이에 주로 발생하며, 발생원인은 다층용접에 있어서의 국부적인 개선형상의 변화에 의해 Accessibility가 불량할 때 용접 Arc 길이의 증가에 따른 입열부족 때문에 발생한다. 뿐만 아니라 용접전류, 전압, 용접속도등 용접조건을 잘못 선택함에 따른 불충분한 입열과 모재자체가 지나치게 냉각되어 있는 경우에도 이 결함을 유발하는 요인이 될 수 있다.

(3) 기 공

이 결함의 발생원인은 용접재료의 불완전한 건조, 부적절한 탈산제를 함유한 용접재료의 사용 또는 액체상태에서의 고체상태에서의 Gas의 용해도의 차이에서 발생하며, 또한 빠른 용접속도하에서 Gas와 수축효과가 조합하여 발생한다. 이러한 결함은 물리화학적인 반응에 의하여 통상 구형으로 발생한다.

(4) 균 열

균열의 종류에는 크게 저온균열 및 고온균열의 2가지로 대별할 수 있다. 이중 용접부에서 발생한 결함은 대개 고온균열로 취급된다. 본 수직재의 경우 연강으로서 통상적으로 용접성에 문제가 없는 연강에서는 저

온균열이 잘 발생하지 않음을 감안하고 또한 발생된 균열의 위치가 용접 부임을 감안할 때, 용접부에 발생된 균열은 고온균열 또는 피로에 의해 발생된 피로균열로 우선 간주할 수 있다.

고온균열은 용접후 바로 발생하는 균열로서, 균열면에 페인트 도장이 스며들었는지로 확인이 가능할 수 있으며, 또한 파면은 취성파괴의 형상을 보이므로 쉽게 확인이 가능하다. 따라서 SEM 파면관찰시험결과 용접부의 파단면이 연서파괴로 나타난 점을 감안할 때, 발견된 균열은 피로에 의해 사용중 발생한 균열로 간주함이 바람직한 것으로 사료된다.

3-3-2 용접결함의 종류 및 빈도

방사선투과탐상시험 결과 확인된 결함의 종류별로 빈도수를 조사한 결과는 다음 (표 3-3)과 같다.

(표 3-3) 용접결함 종류별 빈도수

용접결함의 종류	결함 빈도수	비율(%)	비 고
합 계	111	100.0	
용 입 부 족	90	81.1	
용 합 불 량	5	4.5	
용입부족및용합불량	4	3.6	
용 입 부 족 및 기 공	6	5.4	
용 합 불 량 및 기 공	2	1.8	
용 입 부 족 및 균 열	2	1.8	
균 열	1	0.9	
무 결 함	1	0.9	

표에서 보듯이 확인된 용접결함은 용접에서 가장 엄격히 관리되고 있는 용입부족, 융합불량 및 균열이 대부분이며, 확인된 용접결함중 성수대교 수직재의 맞대기용접 이음에서 가장 빈도수가 높게 나타난 결함은 용입부족으로서 전체 검사개소 111개소중 102개소에 걸쳐 나타났으며, 특히 균열발생 2개소가 용입부족과 함께 나타난 점으로 미뤄볼 때 균열발생에 있어서 용입부족에 의한 용접결함이 가장 큰 원인이 된 것으로 생각된다. 또한 파단된 수직재(강북 중앙 상부 수직재)에서 일부 육안으로 확인된 바와 같이 융합불량이 균열의 촉진에 영향을 미쳤을 개연성은 있으나, 다른 균열부위에 융합불량의 결함이 없는 점을 감안할 때 그 영향은 미미한 것으로 판단된다.

3-3-3 용접개선면의 간격

방사선투과탐상시험 결과에 따라 용접개선면의 간격을 측정한 결과를 다음(표3-4)에 나타내었다.

(표 3-4) 용접개선면의 간격

개선간격(mm)	빈 도 수	비 율(%)	비 고
합 계	111	100.0	
0	15	13.5	
0-3이하	74	66.7	
3초과 4이하	10	9.0	
4초과 5이하	8	7.2	
5초과 6이하	0	0.0	
6초과 7이하	1	0.9	
7초과	0	0.0	
측정불가	3	2.7	

표에서 보듯이 전반적으로 개선간격은 별 문제가 없는 것으로 사료된다. 즉 통상적으로 요구되는 개선간격 0~3mm 범위의 경우 전체 111검사개소 중 92개소로 약 83%가 만족된 것으로 나타났으며, 특히 개선간격 5mm까지는 용접에 있어서 큰 문제가 없음을 감안하고 또한 방사선투과탐상시험에 있어서 결함의 크기는 약간 확대되어 나타나므로 약 99.1%의 검사개소가 적합한 것으로 사료된다.

3-3-4 용입 깊이

앞에서도 기술한 바와 같이 용접결함중 용입불량이 가장 크게 문제가 되고 있으므로 여기서는 용입 깊이에 대하여 좀더 상세히 분석을 수행할 필요가 있으며, 또한 용입 깊이를 검토함에 있어서는 양면의 용입 깊이를 별도로 검토할 필요가 있으므로 거셋판과 접촉되어 용접여성이 제거된 면을 이면으로 하고 용접비이드가 그대로 존재하고 있는 면을 표면으로하여 각각의 용입 깊이와 전체 용입 깊이를 검토하였다. (표 3-5)는 표면측의 용입 깊이를, (표 3-6)은 이면측의 용입 깊이를 각각 나타내었으며, (표 3-7)은 전체 용입 깊이를 나타내었다.

각각의 표에서 보듯이 표면측의 평균 용입 깊이는 약 5.2mm, 이면측의 평균 용입 깊이는 약 2.8mm, 전체 평균 용입 깊이는 약 8.0mm로 나타났다. 평균용입 깊이 8.0mm는 모재두께 18mm의 약 44.5% 정도만이 용입되었음을 의미한다.

(표 3-5) 표면측의 용입깊이

용입깊이(mm)	빈 도 수	비 율(%)	비 고
합 계	111	100.0	
1	1	0.9	
2	24	21.6	
3	16	14.5	
4	9	8.1	
5	10	9.0	
6	13	11.7	
7	10	9.0	
8	6	5.4	
9	1	0.9	
10	6	5.4	
11	1	0.9	
완전용입(18)	11	9.9	
측 정 불 가	3	2.7	

(표 3-6) 이면측의 용입깊이

용입깊이(mm)	빈 도 수	비 율(%)	비 고
합 계	111	100.0	
1	35	31.5	
2	34	30.6	
3	11	9.9	
4	12	10.9	
5	4	3.6	
6	1	0.9	
완전용입	11	9.9	
측정불가	3	2.7	

(표 3-7) 전체 용입깊이

용입깊이(mm)	빈 도 수	비 율(%)	비 고
합 계	111	100.0	
2	1	0.9	
3	11	9.9	
4	20	18.0	
5	9	8.1	
6	6	5.4	
7	12	10.8	
8	7	6.3	
9	9	8.1	
10	8	7.2	
11	5	4.5	
12	5	4.5	
13	2	1.8	
14	1	0.9	
15	1	0.9	
완 전 용 입	11	10.0	
측 정 불 가	3	2.7	

3-4 피로시험을 위한 시험편 형상기준

이상의 시험결과를 고려하여 피로시험을 위한 시험편 형상기준을 다음과 같이 결정하였다. 결함의 종류는 용입부족 외에도 여러가지가 있으나 대부분의 결함이 용입부족이며, 또한 동일한 용접을 재현하는 데 어려움이 있기 때문에 용접 결함을 한가지로만 제한하였다. 용접 개선면의 간격 및 용입 깊이는 평균치를 선택하였다.

구 분		형 상 기 준	비 고
결 함 의 종 류		용입부족	
용접개선면의 간격		3mm	
용입깊이	표 면	5.2mm	
	이 면	2.8mm	

4. 재료 시험

4-1 개 요

사고의 원인을 분석함에 있어서 제반 시공조건의 적합성을 검토하는 것도 필요하지만 그 전에 사용된 재료의 적합성 여부와 사고 파단면의 관찰 해석을 통한 사고원인의 분석에 대한 검토가 우선되어야 한다. 특히 본 교량에 사용된 강재는 포항종합제철에서 후판을 처음으로 생산한 시기에 제작 공급된 제품으로서 그 품질에 대하여 의문을 가진 사람이 많은 점을 감안할 때, 사용재료의 적정성 여부를 확인할 필요가 있다. 뿐만 아니라 파단면의 관찰을 통한 파괴종류의 확인은 그에 따른 파괴의 양상을 추정하고 사고원인 및 피로파괴의 진전상황을 분석하는데 도움이 될 수 있다.

재료의 확인은 적정재료의 사용여부에 대한 확인에 그치는 것이 아니라 그와 관련된 피로시험의 Data로 활용할 수 있으며, 관련 기계적 성질은 각종 분석의 중요한 기초자료로 사용될 수 있다. 또한 충격시험에 있어서의 천이온도와 K_{Ic} 값은 피로파괴의 진전양상을 해석하는데 중요한 자료가 된다.

본 장에서는 이러한 목적달성을 위하여 수행한 각종 시험의 방법 및 결과에 대하여 고찰하고 재료의 제반 물성치를 확정함으로써 차후 수행될 각종 시험 및 분석의 기초자료로 제공코자 한다.

4-2 시험방법 및 내용

사고가 일어난 성수대교 현수지간 트러스(Suspended Truss)에서 파단이 일어난 수직부재를 중심으로 94년 12월 12일 검찰측 감정단의 지휘하에, 서울시 관계 공무원과 동아건설 관계자 및 관할 경찰서 요원들이 입회하

고 용접기술자, 잠수부 등이 동원되어 수중에 잠겨있는 부재는 수면으로부터 약 1m 깊이에서 절단하여 수거하였고, 앵커 트러스에 달려있는 파손된 수직 부재의 일부를 처음에는 핀을 제거한 후 수직재 부분만 제거하려 하였으나 여의치않아 핀이 달려있는 상태로 사재와 수직재, 상현재를 연결하는 가셀트 판(Gusset Plate)을 절단하여 수거하였다. 수거된 부재를 모두 교량 상판 위로 옮긴 후 필요 없는 부분을 제거하고 검찰측 증거물로 10여개의 절단부 재들을 보존하였다.

여러가지 물성시험과 파단면 관찰을 하기 위하여 포항에 위치한 재단법인 산업과학기술연구소(RIST)로 운송하여 시편제작을 위해 필요한 만큼 절단한 후, 증거물 보전을 위해 다시 서울지방검찰청으로 운송하였다.

붕괴된 교량으로부터 채취된 증거물에서 제작된 시편으로부터 강재의 화학 성분 분석, 파단면 관찰과 기계적 성질을 결정하여 사용된 재료의 적합성 여부와 사고원인을 밝히려는 여러가지 시험이 수행되었다. 특히 인장시험을 통하여 교량에 사용된 강재의 항복강도, 극한인장강도, 신장량(Elongation) 및 재료상수인 영계수(Young's Modulus)가 결정되었다. 화학성분 분석과 물리적 물성시험을 통하여, 사용된 鋼板과 용접봉의 종류를 결정할 수 있었고 이 기초자료에 의하여 실물대 크기의 피로시험용 시편제작에 사용된 강판과 용접봉을 선택할 수 있었다. 더욱이 파단면을 전자현미경으로 관찰하여 파단면이 피로균열(Slow Stable Fatigue Crack)에 의한 것인지 취성파단(Unstable Fast Fracture)에 의한 단면인지를 판단하였고 파단역학(Fracture Mechanics)의 물성치인 K_{Ic} 및 K_{Id} , 즉 정적 및 동적 파단靱性(Fracture Toughness) 값을 몇가지 시험을 통하여 추정할 수 있었다. 또한 수직부재에 사용된 강재에 대하여 Charpy V-Notch 곡선이 작성되었다.

4-3 강재화학성분 분석 (Chemical Analysis)

4-3-1 시험방법

강재에 포함되어 있는 각종 합금원소들의 함량을 측정하고 이것을 바탕으로 강재의 종류와 용접성을 확인하기 위하여 수거된 강재에 대해 화학성분 분석을 수행하였다.

강재의 화학성분 분석은 성수대교 현장에서 수거한 부재파편으로부터 시료를 채취한 다음, 정밀도를 확보하기 위하여 Arc에 의한 건식분석법을 지양하고 Steel Chip을 만들어 습식분석법으로 파단면에 가까운 모재와 용접재에서 팔알정도(mg단위)의 작은 파편 1/4컵 만큼 각각 채취하여 산업과학기술연구소(RIST) 화학실험분석실에서, 탄소·인·유황·질소·망간·규소등의 함량을 각각 구하였다.

다음 (표 4-1)은 산업과학기술연구소 화학분석에 의한 성수대교 수직부재의 강재성분 분석의 결과이다.

(표 4-1) 강재화학성분분석 결과

(단위 : %)

구 분	燐	망 간	규 소	炭 素	유 황	질 소	비 고
	P	Mn	Si	C	S	N ₂	
모 재	0.037	0.88	0.30	0.17	0.018	0.0052	
용접재	0.016	0.60	0.24	0.09	0.019	0.012	

4-3-2 시험결과와 분석

가. 모 재

강재의 화학성분 분석 결과 포함된 각 원소들이 강재의 성질에 미치는 영향은 다음과 같다. 망간은 제강에 필요불가결한 원소로서 함유량이 0.8%까지는 유황(Sulphur : S)과 결합하여 높은 온도에서 부스러지기 쉽게 되거나 충격에 약해지는 성질을 방지하는 경향이 있다. 함유량이 1~15%로 높아지면 망간은 금속의 靱性和 硬化될 수 있는 성질을 증가시킨다.

燐(Phosphorus : P)은 모든 강재에서 발견되는 원소중의 하나이다. 많은 양이 함유되어 있을 때는 불순물로 간주되지만, 적은양일 때는 고탄소강과 저탄소강의 가공성을 증진시킨다. 燐의 함유량은 보통 0.05% 以內로 제한하는데 특히 탄소함량이 많은 강재일 때 그렇다. 저탄소강의 강도와 방식 性能을 약간 증진 시키기도 한다.

硫黃(Sulphur)은 燐과 같이 모든 강재에 일반적으로 불순물로 存在한다. 강재의 유황함유량은 0.3%까지 될 때도 있지만 보통 0.06% 以下로 유지한다. 유황의 함유량이 높으면 용접시 높은 온도에서 균열(Hot Short Cracking)과 기포(Porosity)가 많이 발생 하기 때문에 용접성이 나빠진다. 이러한 용접균열과 공동을 많이 발생시키는 경향은 저수소계 용접봉(Low-Hydrogen Electrode)을 쓰면 방지 가능하다.

규소(Silicon)는 강재의 산소 함유량을 조절하기 위하여 용광로에 있을 때 가해지며 환원제로 쓰인다. 함유량이 많으면 磁性(자성)을 띠기 때문에 전자기用의 강재에 활용된다. 규소를 첨가하면 산화에 대한 저항과 강재의 硬度를 증가시키는 경향이 있다.

窒素(Nitrogen : N₂)는 일반적으로 다른 원소와 화합하여 窒化物로서 존재하는데, 窒化物는 대부분 有害한 영향을 준다.

특별시방서상에 규정된 강재가 KS D3515 용접구조용 압연강재에 규정된 SWS400B 인점을 감안하여 시험결과를 SWS400B 규격과 직접 비교 검토한 결과를 다음 (표 4-2)에 나타내었다.

(표 4-2) 모재의 화학성분 분석결과 비교

구 분	P	Mn	Si	C	S	N ₂	비고
SWS400B	0.035이하	0.60-1.40	0.35이하	0.20이하	0.035이하	-	
시험결과	0.037	0.88	0.30	0.17	0.018	0.0052	

(표 4-2)의 결과를 검토할 때, P값을 제외하고는 SWS400B의 규격치를 충분히 만족시키는 것으로 조사되었으며, P값 역시 0.002%가 증가된 수치로 강도 및 용접성에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

산업기술연구소의 성분분석 결과를 보면 성수대교 수직부재에 사용된 강재는 저탄소강으로(Carbon content 0.05~0.330%) 일반적인 경우보다 — 일반적인 저탄소강에서 보다는 — 많은 양의 망간(Manganese:Mn)을 함유하고 있다(일반적인경우 0.6%내외).

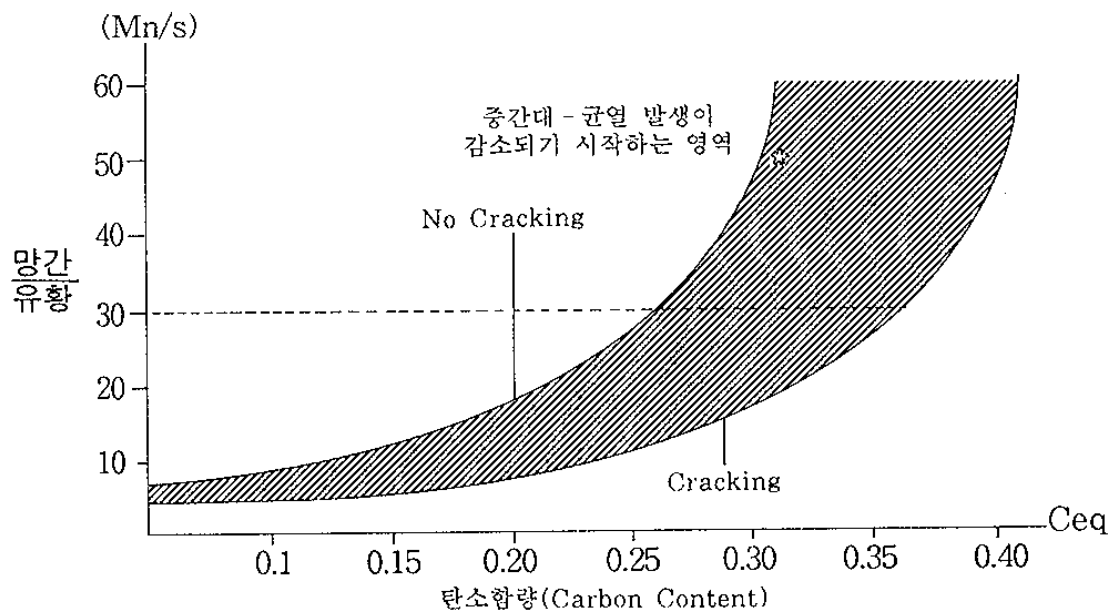
성분 분석표에 나타난 결과는 사용된 강재가 망간의 함량이 조금 많기는 하지만 저탄소강의 예상 성분분석과는 크게 어긋나지 않았다.

탄소-망간 강재의 용접성은 주로 강재의 성분구성과 두께에 의존한다. 용접하기에 좋은 강재인지 아닌지의 판단은 성분분석으로부터 두 가지 방법으로 구분할 수 있다: 망간에 대한 유허의 함유량의 비(Mn/S)와 탄소당량(Carbon Equivalent).

망간과 유황의 비(Mn/S)는 미세균열이 생기는 경향의 척도이다. 미세균열은 용융점에 가까운 높은 온도에서 Mn/S 비가 30미만일때 많이 생기는 균열로서 고온균열(Hot Cracking)이라고도 한다. 이러한 고온균열은 모든 금속에 공통적인 성질로서 용접에 의해 열영향을 받는 부분(Heat Affected Zone, HAZ)에서 미세균열을 피하기 위해서는 Mn/S비가 50~60이어야 한다. 이에 반하여 탄소당량이 0.4~0.45% 이상이 되면 용접된 강판이 냉각되기 시작한 후에 용접비드 아래에 균열(Underbead Crack)을 발생시키는 경향이 있다. 이러한 균열을 저온균열(Cold Cracking)이라고도 한다. 탄소당량은 강재에 함유된 각종 화학성분을 다음과 같은 式을 이용하여 탄소의 함량으로 환산한다.

$$C_{EQ} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad \text{식(4-1)}$$

이러한 탄소당량과 Mn/S비가 용접성에 미치는 영향은 다음 (그림 4-1)과 같다.



(그림 4-1) Mn/S에 의한 강재의 용접성

성수대교에 사용된 모재의 탄소당량은 $C_g=0.32$ 이며 망간 대 유황의 비는 $Mn/S=49$ 로서 (그림 4-1)에 이 강재의 용접성을 나타내는 위치가 표시되어 있다.

나. 용접부

용접부의 경우는 용접부 및 모재간에 합금원소의 확산이 발생하기 때문에 용접부에 대한 화학성분의 단순한 비교·분석에 의하여 사용된 용접 재료를 확인하는 것은 사실상 어렵다. 따라서, 용접봉 제조자가 발간한 각종 용접재료의 용접부 화학성분 분석치를 비교 검토하고 특별시 방서의 내용을 검토하여 사용된 용접재료를 대략적으로 유추하여 추정할 수 밖에 없는 실정이다. 유사한 용접부 화학성분 분석치를 비교 검토한 결과는 다음 (표 4-3)과 같다.

(표 4-3) 용접부 화학성분분석결과의 비교

구 분	P	Mn	Si	C	S	N_2	비 고
시 험 결 과	0.016	0.60	0.24	0.09	0.019	0.012	
KSE4316	0.012	0.96	0.45	0.08	0.009	-	저수소계 LH-100(조선선재) 후판 용접용
KSE4327	0.015	0.64	0.33	0.09	0.011	-	철분산화철계 S-6017A(현대) 고능률 하향용접용
KSE4327	0.018	0.65	0.34	0.07	0.012	-	철분산화철계 CF-120(조선선재) 고능률 하향용접용

(표 4-3)에서 보듯이 시험결과와 가장 유사한 Data는 현대중합금속의 S-6017A로 사료되나, 현대중합금속(주)가 1977년 1월부터 용접재료를 생산한 점과 특별시방서에 저수소계 용접봉을 사용토록 규정되어 있는 점을 감안할 때, 현대중합금속에서 생산한 용접재료는 배제되어야 할 것으로 사료된다.

전체적인 상황을 검토할 때, 고능률 하향용접에 사용되는 KSE4327의 철분산화철계 용접봉을 사용했을 것이라는 의심은 있으나, S_i 의 비율에서 큰 차이가 있고 또한 모재 자체가 연강이므로 용접성에는 큰 문제가 없으며, 특별시방서의 재료까지 문제를 삼기에는 어려우며, 특히 확산에 의한 화학성분의 불균일이 쉽게 발생될 수 있는 상황에서 화학성분의 분석 결과만을 가지고 판단하기에는 위험부담이 크므로 본 용접재료는 연강용 저수소계 용접봉을 사용한 것으로 결론지음이 바람직한 것으로 사료된다.

4-4 강도시험

4-4-1 인장 강도 시험

가. 시험방법

한국표준시험기준(KSTM)에 의해 제작된 3개의 시험편을 가지고 95년 1월 9일 산업과학기술연구소(RIST)의 재료시험실에서 인장시험을 한 결과는 다음 (표 4-4)에 나와 있다.

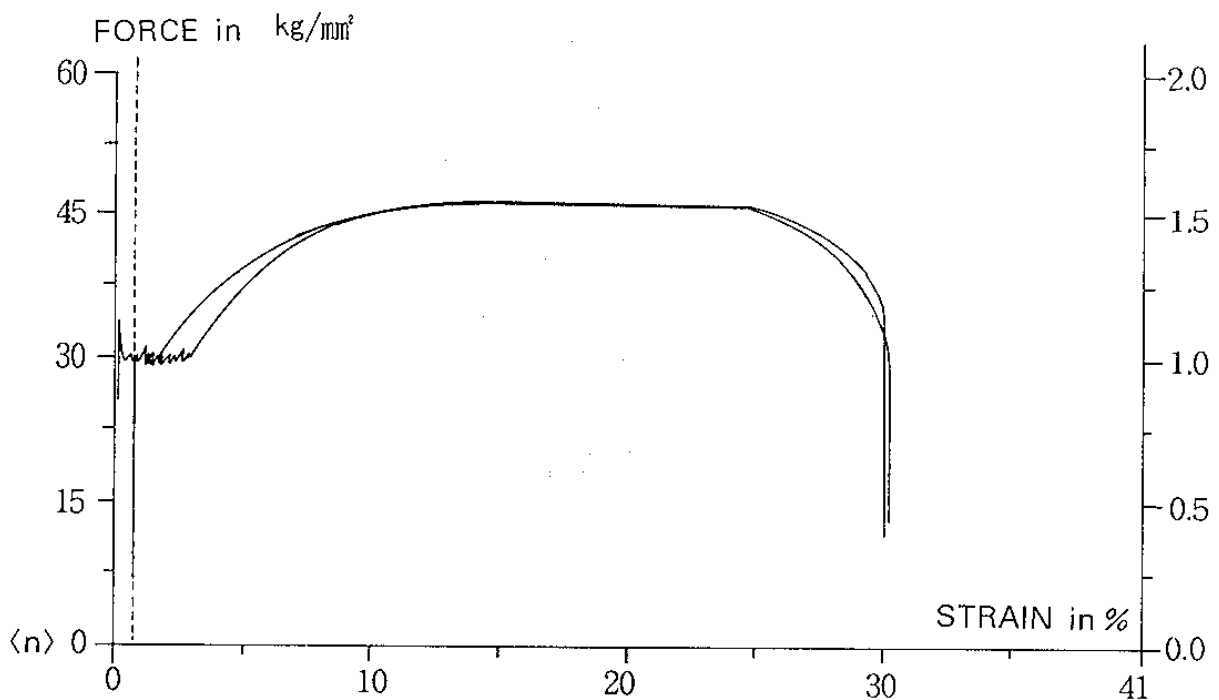
인장시험은 성수대교에서 수거한 부재에서 채취한 강판 두께를 그대로 사용하여 KS B0801(금속재료 인장시험편)의 1A호 시험편으로 하였으며, 시험의 정확성을 기하기 위하여 ASTM 규격에 따라 변형량을 제어하는 방법으로 재하속도(Crosshead Speed)는 10mm/min로 재하되었다.

나. 시험결과와 분석

특별시방서상에 규정된 강재가 한국공업규격 KS D3515 용접구조용 압연강재에 규정된 SWS400B인 점을 감안하여 시험결과를 SWS400B 규격과 직접 비교 검토한 결과는 다음 (표 4-4)와 같으며 인장시험에 의한 이 강재의 응력 - 변형도 곡선은 (그림 4-2)이다.

(표 4-4) 모재의 인장시험 결과

구 분	두께 (mm)	나 비 (mm)	면적 (mm ²)	항복강도 (Kg/mm ²)	인장강도 (Kg/mm ²)	신율 (%)	비 고
SWS400B	-	-	-	24 이상	41-52	22 이상	
시험편 1	17.5	39.9	698.3	30.9	46.0	30.0	
시험편 2	17.5	39.9	698.3	29.7	45.9	29.0	



(그림 4-2) 인장시험에 의한 응력 변형도 곡선

모재는 인장강도가 41~52kg/mm² 사이에 있고, 항복점 강도는 25kg/mm² 以上이므로 일반적인 구조용강재인 SS41 또는 SWS41의 표준 강성 범위내에 있다.

시험결과는 규격의 요건을 충분히 만족한 것으로 판단된다. 다만, SWS400의 요건은 만족되나 충격에 의한 Grade인 A, B, C의 구분은 충격시험에 의한 Grade의 확인이 필요하다.

4-4-2 Charpy V-Notch 충격시험

가. 시험방법

충격시험은 전 4-4-1 나.에서도 언급하였듯이 정확한 강종을 확인할 수 있는 자료가 될 뿐만 아니라 충격시험에 의해 확인되는 천이온도는 피로균열의 진전과 관련된 해석에도 유용한 자료가 될 수 있다.

수직부재의 Charpy V-Notch(CVN) 충격시험편은 한국공업규격 KS B0809(금속재료 충격시험편)에 의한 샤프 충격시험용 4호 시험편으로 수행되었다. 부재의 길이방향에서 채취한 총 29개의 시험편을 가지고 10℃ 간격으로 0℃에서부터 -60℃까지 각 온도 Level에서 -40℃와 -60℃를 제외하고는 3개씩의 시험편이 시험되었다. -40℃와 -60℃에서는 천이온도(Transition Temperature)를 확인하기 위하여 각각 5개의 시험편을 시험하였다. 각 온도등급에서 시험편은 약 10분씩 같은 온도를 유지하도록 한 후 시험을 실시했다. 시험의 결과는 (표 4-5)에 요약되어 있다.

(표 4-5) 모재의 충격시험 결과

단위(Joule)

구 분	상온	0℃	-10℃	-20℃	-30℃	-40℃	-40℃	-60℃	-60℃	비고
시편 1	47.5	37.0	28.4	24.5	20.2	14.5	14.0	6.4	3.0	
시편 2	58.0	35.8	33.5	22.8	19.2	7.2	15.4	7.2	6.2	
시편 3	53.6	31.7	32.0	22.8	20.8	8.3	-	2.7	-	

나. 시험결과의 분석

KS D3515에 의하면 SWS400B는 0℃에서 샤피 흡수에너지가 27Joule 이상이 되도록 규정하고 있는 바, 시험결과는 최저치가 31.7Joule 이상으로 SWS400B의 규격을 충분히 만족하는 반면, 0℃에서 47Joule 이상인 SWS400C의 규격은 만족시키지 못하였다. 따라서 본 강재는 SWS400B의 규격임이 확인되었으며, 또한 SWS400B의 규격을 충분히 만족시킨 것으로 확인되었다.

한편 천이온도의 확인을 위하여 (표 4-5)의 값을 이용하여 (표 4-6)과 같이 파단 인성치를 산정하여 (그림 4-3)과 같이 충격흡수치-온도 곡선을 그려본 바, 정확한 Data는 아니지만 대체적으로 -40℃에서 곡선의 기울기가 변한 점으로 미뤄볼 때 본 재료의 천이온도는 대략 -40℃정도로 사료된다.

(표 4-6) CVN 값으로 산정한 파단 인성치

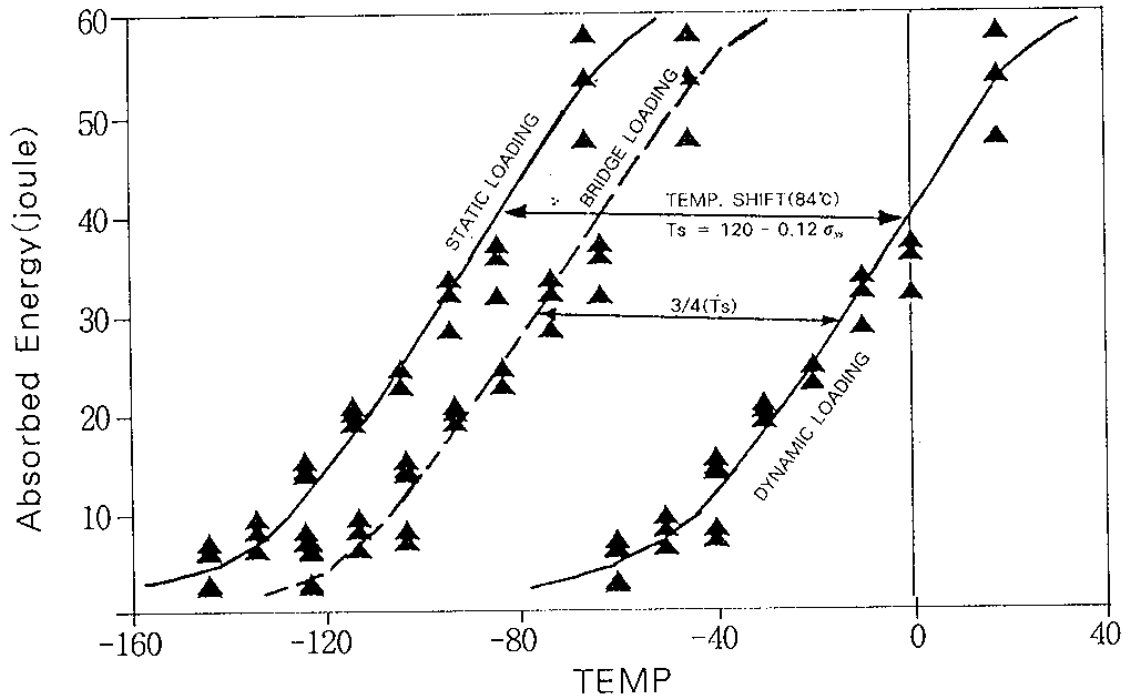
1ft-lb = 1.36 joule(newton-m)

$$K_{1d} = [5E(CVN)]^{\frac{1}{2}}$$

Eavg = 29600ksi

Estimated Fracture Toughness K_{1d}

No.	Temp			Hold Time	CVN(joule)			CVN(ft-lb)			K_{1d} (ksi√in)		
	Dyna	Static	Bridge		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	18	-66	-45	10min	47.5	58.0	53.6	34.9	42.6	39.4	71.9	79.4	76.4
2	0	-84	-63		37.0	35.8	31.7	27.2	26.3	23.3	63.5	62.4	58.7
3	-10	-94	-73		28.4	33.5	32.0	20.9	24.6	23.5	55.6	60.4	59.0
4	-40	-124	-103		14.5	7.2	8.3	10.7	5.3	6.1	39.7	28.0	30.1
5	-20	-104	-83		24.5	22.8	22.8	18.0	16.8	16.8	51.6	49.8	49.8
6	-30	-114	-93		20.2	19.2	20.8	14.9	14.1	15.3	46.9	45.7	47.6
7	-50	-134	-113		8.3	9.6	6.4	6.1	7.1	4.7	30.1	32.3	26.4
8	-60	-144	-123		6.4	7.2	2.7	4.7	5.3	2.0	26.4	28.0	17.1
9	-60	-144	-123		3.0	6.2		2.2	4.6		18.1	26.0	
10													
11	-40	-124	-103		14.0	15.4		10.3	11.3		39.0	40.9	



(그림 4-3) Charpy V-Notch 시험결과

시험의 결과를 보면 성수대교 수직부재에 사용된 강재의 천이온도는 -40℃이며 20 Joule(15ft-lb)에 해당하는 온도는 -30℃이다. 상선반 에너지 등급(Upper Shelf Energy Level)은 조사자료의 부족으로 판단이 불가능하다.

이 시험을 통하여 구한 CVN 시험결과는 매우 양호한 편이다. 20 Joule (15ft-lb) 기준온도 -30℃와 천이온도 -40℃는 이 재료가 낮은 온도에서도 충격에너지를 흡수하는 능력이 매우 뛰어남을 보여준다. 따라서 겨울철의 한강온도가 -20℃를 잘 넘지 않는 점을 감안할 때, 온도에 의한 충격 에너지의 저하로 인한 저온인성치의 문제는 없는 것으로 사료된다.

이 결과는 동적하중으로 구한 CVN 값으로 정적하중에 대한 CVN 결과는 온도이동(Temperature Shift)를 통하여 구할 수 있다.

$$T_s = 120^\circ - 0.12 \sigma_{ys} = 84^\circ\text{C}$$

84℃ 만큼 온도를 이동하여 구한 값이 (그림 4-3)에 나타나 있다. 교량에 작용하는 활하중에 대한 파괴인성치의 지표가 되는 CVN은 이 T_s 의 75%만 이동하여 구하며 그 값은 (그림 4-3)에 표시되어 있다.

4-4-3. 파단인성시험(Fracture Toughness Test)

파단인성치는 균열이 생긴 부재의 물성치이다. 이 시험에서 구한 파단인성치는 응력조건과 균열상태 및 크기를 고려하여 산출된 응력강도 계수(Stress Intensity Factor)와 비교하여 보면 균열의 안정성을 알 수 있다. 응력을 받고 있는 특정 크기의 균열의 응력강도 계수 K 와 재료 파단인성치(Fracture Toughness) K_c 와의 관계는 어떤 부재의 응력과 항복응력 또는 좌굴 응력과의 관계와 같이, 응력강도 계수 K 값이 재료 상수인 K_c 값보다 낮으

면 안정된 균열로서 파단의 위험이 없으나, K_{IC} 값보다 높으면 언제 급속한 파단(Fast Fracture)이 일어날지 모르는 불안정한 균열이라고 할 수 있다.

$$\begin{array}{ccc} K & \longrightarrow & k_c \\ \sigma & \longrightarrow & \sigma_{ys} \text{ or } \sigma_{cr} \end{array}$$

이러한 목적에 사용된 시편은 (그림 4-4)과 같이 두께 46mm, 폭 93mm, 시편길이 430mm이며 지점간의 거리는 368mm로서 시험편의 두께 B는

$$B > 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad \text{식(4-2)}$$

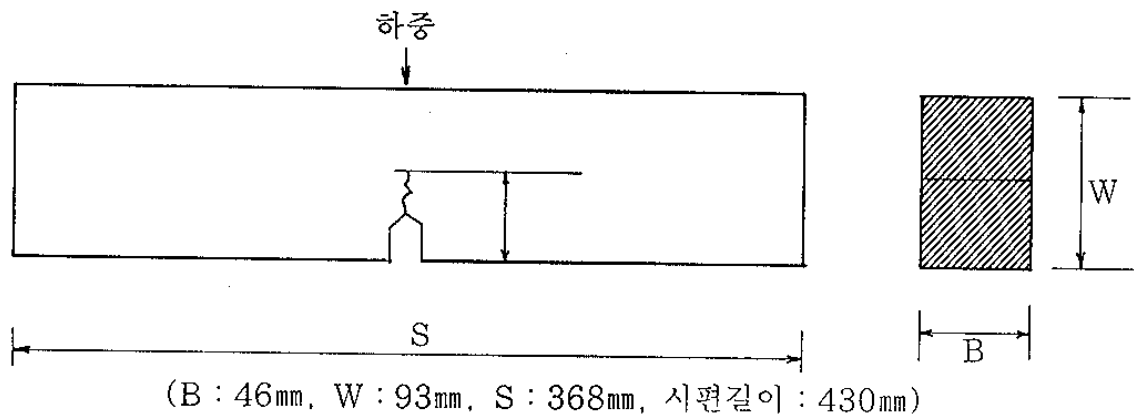
을 만족해야한다.

균열을 가지고 있는 부재의 불안정 파괴(Unstable Fracture Failure) 조건을 결정하기 위하여 ASTM E399-83에 의거 미리 정해진 크기의 균열을 만들고 이 균열로 부터 인위적으로 피로균열이 생기도록 3개의 시험편을 제작하였다.

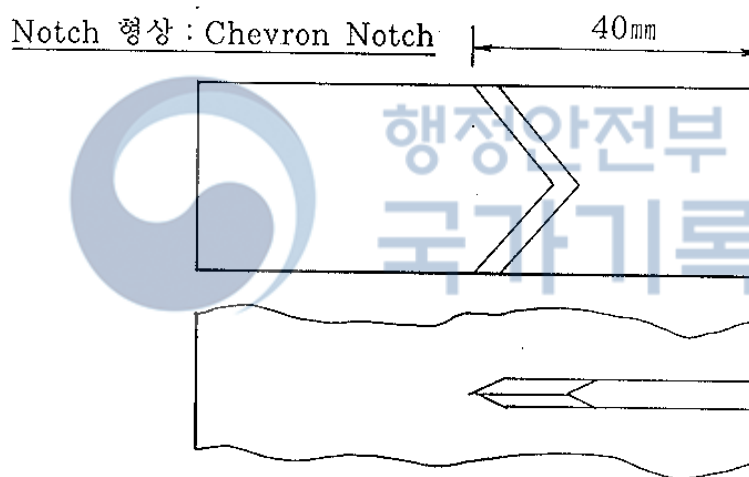
가. 시험방법

본 시험은 피로균열의 진전 양상을 해석하기 위한 Data의 확보를 목적으로 시험을 수행하였다. 즉 본 재료가 평면응력상태에서 어느 정도의 균열저항성을 가지는지를 확인하고, 그 값을 이용하여 균열진전의 사항을 해석하기 위한 기초자료의 확보에 그 목적이 있다.

시험편의 형상과 Chevron Notch의 형상은 각각 다음 (그림 4-4) 및 (그림 4-5)와 같으며, 하중조건은 (표 4-6)과 같다. 또한 주파수는 11Hz, 응력비는 0.06 으로, 하중속도는 $0.66\text{MPa}\sqrt{m/s}$ 로 하였다.



(그림 4-4) 시험편의 형상



(그림 4-5) Chevron Notch 의 형상

(표 4-6) 하중조건

균열진전길이	42mm 까지	44mm 까지	46mm 까지
최대피로하중	4,500 Kg	3,750 Kg	3,000 Kg

나. 시험결과

시험결과는 다음 (표 4-7)과 같다. 시험결과는 시험편 두께조건인 $B > 2.5(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2$ 을 만족시키지 못하였다. 그 이유는 본 시험재가 연강으로서 항복강도가 작기 때문인 것으로 사료되며, 통상적으로 연강에 대하여는 파괴인성시험을 수행하지 않는 실정이다. 따라서 본 시험에 의해 획득된 값인 K_Q 값을 K_{Ic} 값으로 바로 사용할 수는 없는 것으로 사료되며, 다만 이러한 Data를 이용하여 추세를 확인하는 데는 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

(표 4-7) 파괴인성시험(정적 3 굽힘 시험) 결과

시 편	K_Q (MPa $\sqrt{m}$)	시험편 두께조건
1	64.75	불 만 족
2	61.43	"
3	60.29	"
평 균	62.16	"

4-5 피로 시험

4-5-1 피로시험의 목적

우리나라에서는 용접 강구조물 특히 용접을 이용한 강교 시공의 역사가 오래되지 않기 때문에 강교의 피로와 파단(Fatigue and Fracture)의 문제가 많지 않았다. 이제 용접을 이용한 강교의 역사가 20년 가까이 되고 급속한 경제 발전으로 교통량과 화물 운송량이 증가하게 되자 강교의 피로와 파

단의 문제가 대두되기 시작하는 것은 당연하다고 하겠다. 이번 사고는 이러한 추세를 증명해주는 한 예라고 할 수 있으나 불행하게도 성수대교의 수직 부재는 여용력이 없는(Non-Redundant) 파단위험 부재(Fracture Critical Member)였기 때문에 많은 인명이 희생되는 사고가 되었던 것이다.

가능한 한 사고가 발생한 수직재와 동일한 조건으로 피로시험을 수행함으로써 피로균열 성장과정(Fatigue Crack Propagation Process)을 분석할 수 있으며, 또한 기존의 시험결과와 비교 및 연구를 통하여 실제 붕괴과정을 이론적으로 설명할 수 있는 수단이 될 수 있다. 따라서 피로시험 결과와 교통량분석 및 재료시험의 결과를 종합해 보면, 본 사고 원인을 분석함에 있어서 객관적이고 명확한 판단자료를 제공 할 수 있을 것이다.

성수대교 트러스구조의 파손원인으로 추정되는 수직부재를 대상으로 실험 크기의 피로시험을 수행하여 피로균열의 성장양상을 재현함으로써 용접시공의 불량에 구조물의 피로수명에 어떻게 영향을 주었는지를 규명하는데 피로시험의 목적이 있다.

4-5-2 시험방법

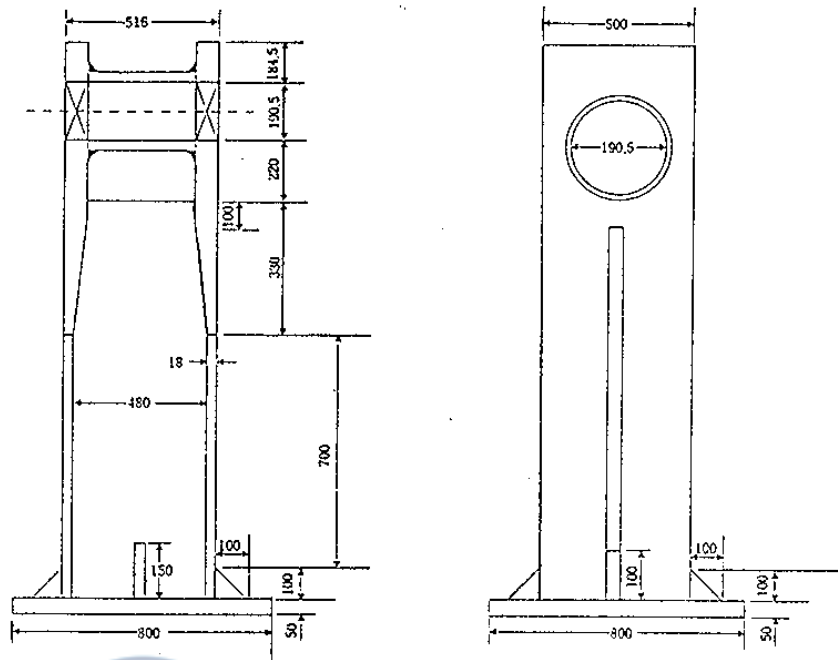
피로수명을 결정하는 네 가지 중요한 변수들(Parameters)은, 반복응력을 받는 구조부재의 세부상세(Detail), 반복응력의 변동폭(Stress Range), 초기균열의 크기(Initial Crack Size) 및 반복하중의 작용횟수 (Number of Loading Cycles)로서, 피로시험을 통하여 피로 강도(Fatigue Strength)를 규명하려고 하면 이중 세가지 변수를 고정하여 파손된 부재와 동일한 조건이 되도록 한다. 부재의 세부상세와 반복응력의 변동폭은 설계시 고려되고 조정될 수 있는 변수이나 초기균열의 크기는 시공시 용접조건에 따라 변하기 때문에 재현이 매우 어려운 변수이다. 반복하중의 작용횟수는 교량의

共用중에 통과하는 교통량에 따른 변수이다. 일반적인 피로시험의 경우, 설계 및 시공에 따른 다른 세가지 변수를 고정하고 구조부재의 균열의 발생, 성장, 파손 단계에 따른 작용하중의 반복 횟수를 자유변수로 보고 이 반복 횟수를 측정한다.

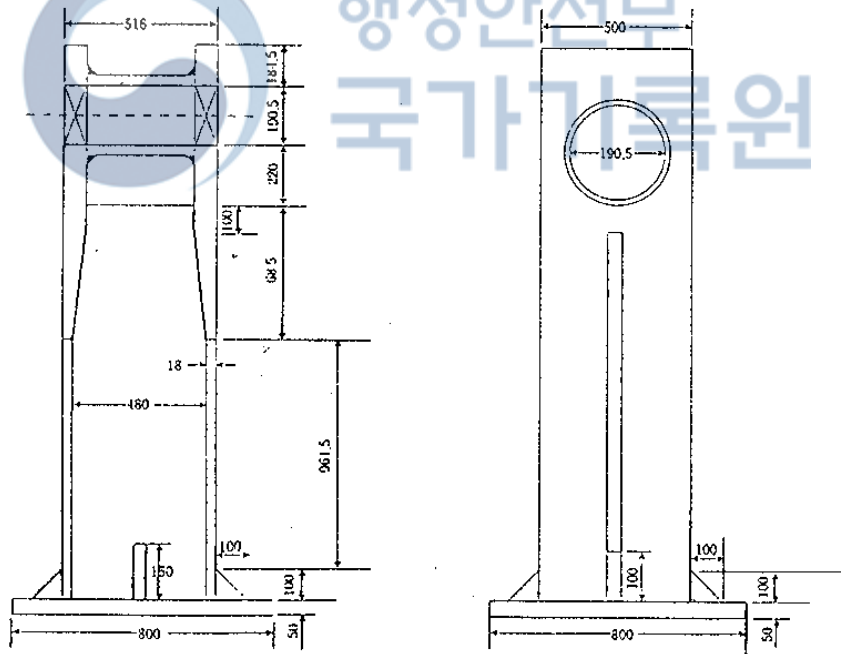
성수대교 수직부재의 파괴양상을 피로시험을 통해 재현하기 위하여 실험대의 크기로 다음 3가지 용접조건에 대해 각각 2개씩 실험대 시험을 제작하여 피로시험을하기로 계획하였다.

- ① 설계도서에 명시된 용접상세대로 제작된 실험대 시험 2조(Full penetration X-cut weld)
- ② 비파괴시험으로 확인된 용접상태를 근거로 평균값을 구하여 평균용접상태를 모사하여 제작한 실험대 시험 2조 (Partial Penetration Weld with Average Weld Depth)
- ③ 파단된 수직부재의 용접상태를 현재 상태 그대로 가장 근사적으로 모사하여 제작된 실험대 시험 2조(Simulated Weld)

사고 현장에서 수거한 강재의 성분분석시험과 인장시험을 통하여 사용된 강재의 종류가 SWS41 "B" Grade 철판임을 확인하였다. 시험의 제작을 위해 철판을 구입하려고 하였으나 철판의 공급이 중단되거나 재고가 없는 상태에서 포항제철에 소량의 주문 생산 의뢰를 하여 시험을 제작하였다. 시험은 피로시험장비의 제한 때문에 전체길이 1,675mm로 516mm×500mm H형 용접부재의 두께 50mm 플랜지가 18mm 플랜지로 단면이 변화한 지점에서 충분히 멀리 떨어진 곳(700mm)에서 시험장비와 연결되도록 (그림 4-6)과 같이 제작되어졌다.



(원 설계 모형)



(그림 4-6) 피로시험용 시편의 상세

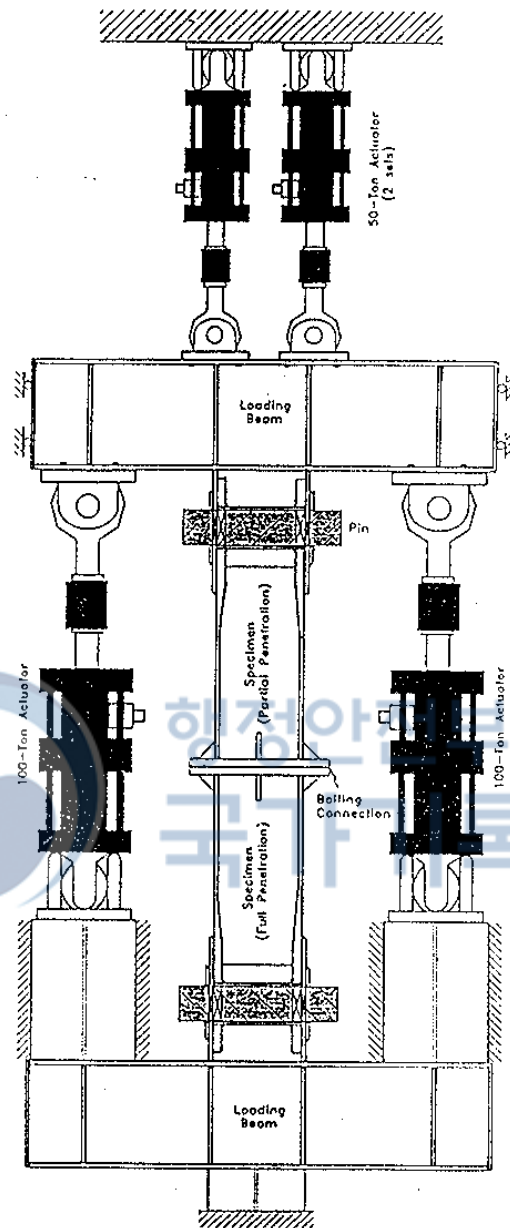
다만, 현재상태에서의 용입깊이를 결정함에 있어서 실제 파단면의 용입깊이의 범위가 다양하므로 비파괴시험 결과 획득한 평균 깊이를 이용하였다.

시험의 신속한 수행을 위하여 설계대로 X자 완전용입을 모사한 시편과 부분용입된 시편을 조합하여 피로시험장비에 (그림 4-7)과 같이 설치하고 설계하중인 DL-18 (Multiple Lane Loading의 경우) 하중에 의한 수직력 58.6 Ton을 활하중에 의한 반복하중으로 재하시켰다.

수직부재에 작용하는 死荷重에 의한 수직력 166.3 Ton은 고정 인장력으로 항상 작용토록 하고, 활하중에 의한 58.6 Ton은 이것에 추가하여 작용하기 때문에 실제로 작용하는 인장력은 min 166.3 Ton에서 max 224.8 Ton 의 범위를 sine curve를 이루며 변화도록 하였다.

부분용입된 시편과 완전용입된 시편 두개를 연결하여 시험장치에 설치하면 피로수명이 낮은 부분에 용입된 시편이 훨씬 먼저 파손된다. 파손된 시편을 제거하고 부분용입된 새로운 시편을 설치하면 완전용입된 시편의 시험기간을 절약할 수 있게된다. 처음 설치한 부분용입된 시편이 130만 사이클에서 균열이 발생하고 260만 사이클에서 완전 파손되었다고 판단되자, 두번째 시편을 설치할 때는 DL-18하중의 응력 수준이 낮은 것을 감안하여 DL-18 하중보다 1/3이 더 큰 DL-24 荷重에 해당하는 수직력을 적용하기로 결정하였다. 이렇게 함으로써 S-N Curve의 한 부분을 확인할 수 있다고 판단하였다. 처음 계획은 3가지 용접조건에 대해 각 2조씩 시편을 제작하기로 하였으나, 파단된 수직부재의 용접상태를 근사적으로 모사하는 것이 거의 불가능하고 피로시험을 조기에 완성해야 할 것이 요구됨으로, 완전용입된 시편 2조와 비파괴시험으로 확인된 평균 용접상태를 모사한 시편 4조를 DL-18 荷重과 DL-24 荷重에 대해 각각 2조씩 피로시험을 수행하기로 변경하였다.

시편의 제작, 설치 및 피로시험 수행은 한국기계연구원 책임 하에 대전에 위치한 한국기계연구원 구조시스템 연구부 피로시험실에서 이루어졌다.



〈그림 4-7 피로시험 전체 조립도〉

4-5-3 시험결과의 분석

제일 처음 설치한 시험체는 설계조건과 같도록 완전용입된 시편과 시공조건과 같도록 부분용입된 시편을 맞붙여놓고 DL-18 荷重을 위한 시험으로서 부분용입된 시편의 플랜지에서 정확하지는 않으나 120만 사이클 전후에서 피로균열이 발생하여 성장해 나가기 시작한 것으로 추정되었다. 부분용

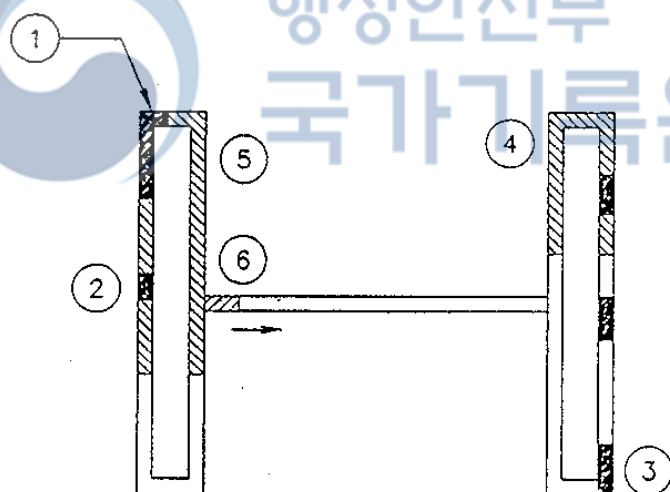
입된 플랜지 바깥쪽 끝에서 시작된 균열은

- ① 아래의 (그림 4-8)과 같이 복부판 쪽으로 진행되어 오다가 150만 싸이클에서 균열의 크기가 96mm쯤 되었을 때
- ②안쪽에서도 34mm 균열이 생기기 시작하였다. 이때의 균열의 성장속도 $\frac{da}{dN} = 8.33 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 이었다. 180만 싸이클일 때 반대편 플랜지의 맞은 편쪽 끝에서도 14mm 균열이 발견되고
- ③ 230만 Cycle일때 균열의 성장속도 $\frac{da}{dN} = 4.39 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ 이 되었으며 좌측 Flange에는 여러개의 균열이 발생하였다.
- ④ 251만 싸이클에서 우측 Flange 상부의 내부용접성 전부가 완전히 분리되고
- ⑤ 균열은 복부판 쪽으로 진행되며 다른쪽 Flange에서도 균열이 시작되었다.
- ⑥ 이 시점부터는 균열의 성장속도가 빨라져서 $\frac{da}{dN} = 1.108 \times 10^{-3} \text{ mm/cycle}$ 이 되었다. 복부판으로 진행된 균열이 29.6mm 크기가 되었을때 더이상 시험을 계속하면은 위험하다고 판단하여 260만 cycle일때 시험을 중단하고 다음 시편과 교체하였다. 이때 완전 용입된 시편에서는 아무런 균열도 발견되지 않았음은 물론이다.

두번째 시험체는 용접깊이가 요구한대로 제작되지 않아 피로시험 분석에서 제외하였다. 세번째 시험체도 첫번 시험체와 동일한 조건과 방법으로 제작되었으나 DL-24 하중을 적용하였다. 최초 균열의 발생시점은 정확하지 않으나 50만 싸이클 전후에서 발생한 것으로 추정되며 99만 3천 싸이클에서 최종 파단된 것으로 추정되었다. 균열이 발생한 위치나 여러개의 균열이 동시에 多發的 발생-성장하는 양상은 첫번째 시험체와 비슷하였다.

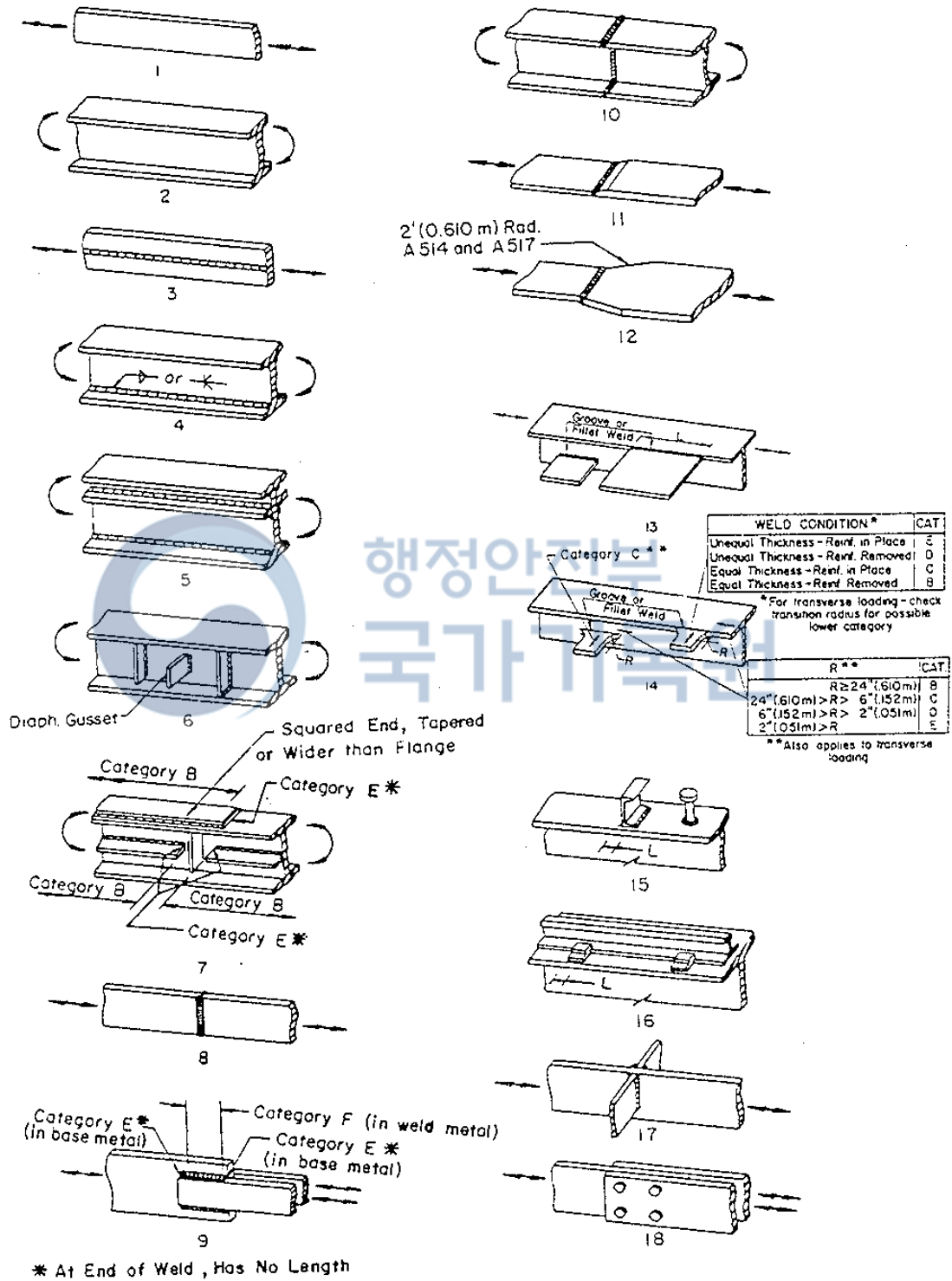
미국의 AASHTO Code의 피로기준과 대한민국 도로교시방서의 피로기준에 의하면 수직부재의 플랜지와 같이 강판의 두께가 50mm에서 18mm로 변하는 곳이 1:2.5 이상의 기울기를 갖고 완전용입 홈 용접(Full Penetration Groove Weld)되고 비파괴검사를 통과하며 용접보강된 면이 모재 표면과 같은 높이가 되도록 볼록한 용접 비드(Bead)를 연마(Grinding) 하였을때는 피로응력범주(Stress Category) B로 분류하며 연마되지 않았을 때는 피로응력 범주 C로 분류한다. AASHTO시방서에서는 피로응력 범주를 구조물의 상세를 그 구조상세의 특성상 균열이 쉽게 또는 어렵게 성장하는 피로강성에 따라 강성이 큰 것에서부터 작은것 순으로 응력범주 A에서 부터 F까지 분류해 놓았다.

균열의 시작

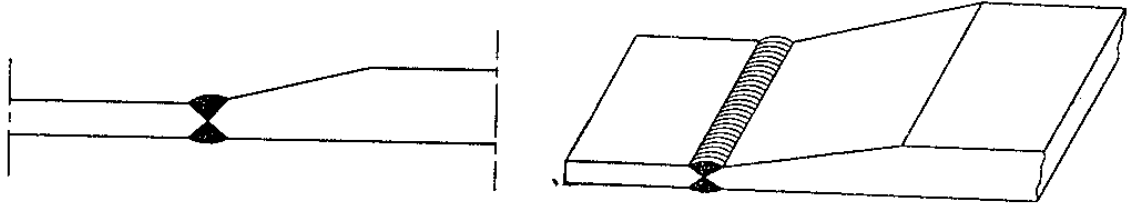


(그림 4-8) 수직부재 용접부위에 피로균열이 생긴 순서(피로시험 결과)

이러한 피로 응력 범주에 속하는 구조연결부의 상세는 (그림 4-9)에 분류되어 있고, (그림 4-10)의 성수대교 수직부재 플랜지 용접상세는 (그림 4-9) AASHTO 시방서의 범주 분류 11번과 같은 상세이다. 각 응력 범주에 대한 허용응력 범위(S_r)와 하중작용 횟수(N)와의 관계는 (그림 4-11)과 같다.



(그림 4-9) AASHTO 피로상세 분류



(그림 4-10) 성수대교 수직부재 용접부위 설계 상세

(그림 4-11)의 가로축(X축)은 피로수명 즉 하중작용 횟수를, 세로축(Y축)은 활하중에 의한 응력변동 범위를 대수(對數) 스케일(Log-Log Scale)로 나타낸다. 응력범주 A는 용접이 가해지지 않은 강재 또는 압연형강(Rolled Form Steel, Wide Beam or Channel)으로 피로강성이 가장 큰 응력범주이다. 그림에서 응력범주 A는 피로강성이 가장 커서 응력변동 범위 $1700\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하에서는 피로의 문제가 없다고 할 수 있다. 응력범주 B는 성수대교 수직부재가 설계도면대로 시공되었을 때의 용접부위와 같은 조건의 완전용입 홈 이음용접(Full Penetration Groove Weld)과 같은 구조상세가 속하는 응력범주로서 피로강성이 두번째로 큰 범주이며 활하중에 의한 응력변동범위가 $1050\text{kg}/\text{cm}^2$ 미만이면 피로균열의 문제는 없다고 할 수 있다.

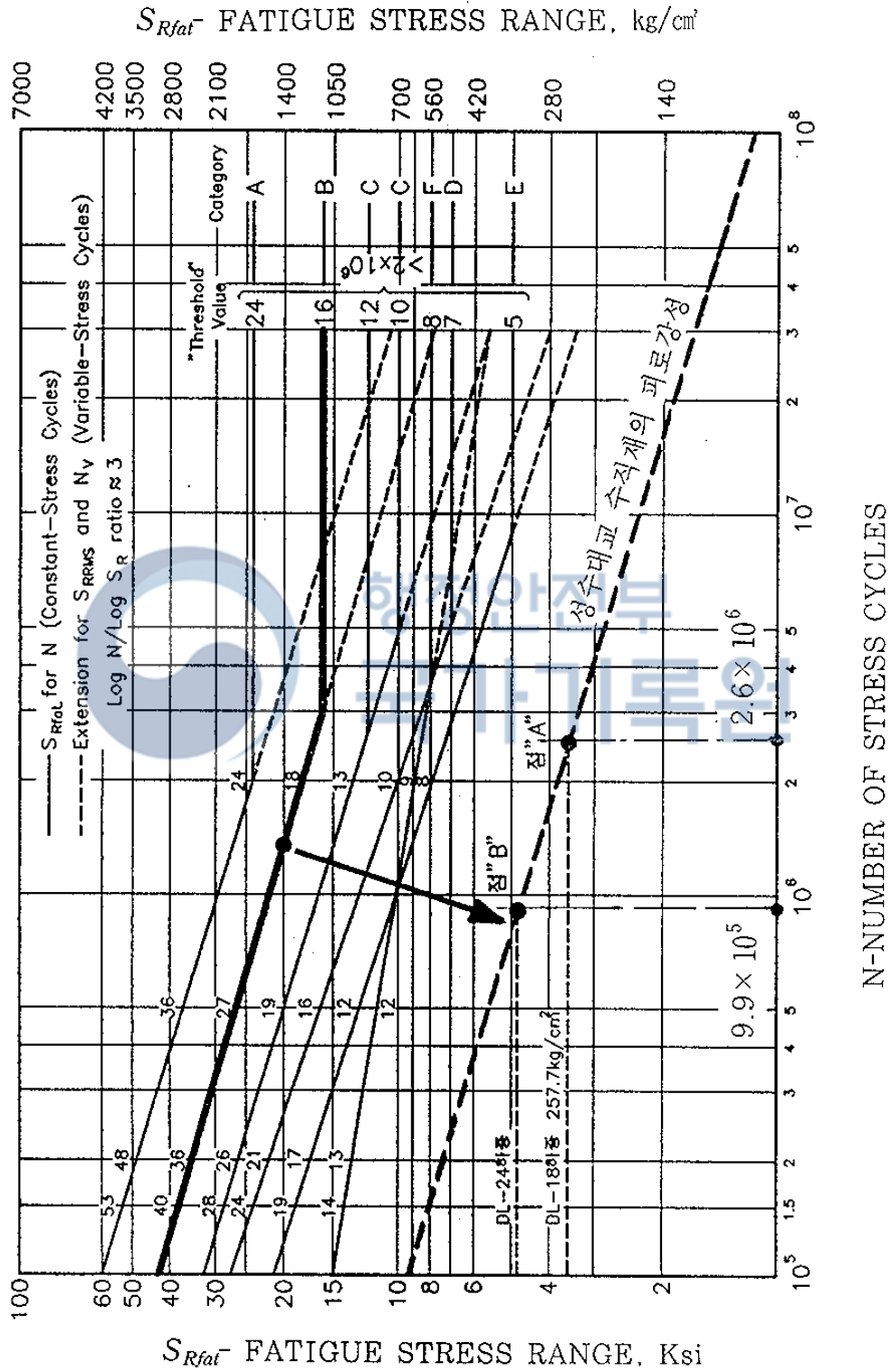
응력범주 E는 제일 피로강성이 낮은 구조상세들로 구성된 범주이다. 필렛 용접이 끝난 곳은 균열이 생기기 쉬운 위치로서 만약 이 균열의 방향이 응력이 작용하는 방향과 직각을 이루게 되는 경우 균열이 쉽게 성장하기 때문에 이 응력범주에 해당하게 된다. 여기서 응력범주직선의 기울기(m)는 강재의 성질에 의해 결정되는 값이지만 구조용 강재의 경우 $m=3$ 이다. 이 (그림 4-11)에 한국기계연구원에서 수행한 수직부재의 피로시험 결과를 도입하면 설계대로 수직재가 제작되었을때와 쉽게 비교할 수 있다.

피로시험이 DL-18 하중인 257.7kg/cm^2 의 응력변동을 작용하였을때 260만 cycle에서 파단된 상태와 같으므로 이 Data는 (그림 4-11)의 점 A에 해당한다. 이 점을 통과하며 기울기가 3인 직선을 그리면 그림의 점선이 된다. 세번째 시험체는 DL-24하중인 342.7kg/cm^2 를 작용했을때 99만 3천 사이클에서 파단되었다고 보면 (그림 4-11)의 B점과 같으며 A점과 B점을 연결하는 직선은 그림의 점선과 같게 된다. 이 점선이 설계도면대로 완전용입이 되지 않고 시공부실로 인하여 성수대교 수직부재와 같이 부분 용입이 된 부재의 피로 강성을 나타내는 직선 식이다. 물론 시험에서도 증명된 것과 같이 완전용입된 시편은 응력변동범위 257.7kg/cm^2 에서는 무한대의 응력사이클이 작용하여도 균열이 생기지 않는다는 것을 응력범주 B직선으로 부터 알 수 있다.

이 (그림 4-11)의 점선이 나타내는 의미는 다음과 같다. 설계대로 수직부재의 용접이 X-자로 완전 용입되었다면 응력범주 B에 해당하는 피로 강성을 가졌을 것이나, 파손된 성수대교 수직부재는 플랜지 두께가 50mm에서 18mm로 변하는 부분이 부분 용입된 상세를 가졌기 때문에 (그림 4-11)의 점선과 같이 피로 강성이 현저히 저하되었다.

다시 말하면 수직부재가 완전용입되었으면 피로 응력 범주 B에 해당하며 50만 사이클일때 허용 피로응력 범위가 $2,050\text{kg/cm}^2$ 이나 실제로는 파손된 부재와 같이 부분 용입되었기 때문에 420kg/cm^2 의 응력범위가 작용하면 50만 cycle일때 부재가 못쓰게 되도록 파손 될 수도 있다는 것을 의미한다.

성수대교 수직부재의 플랜지가 완전 용입 홈 이음용접(Full Penetration Groove Weld)으로 시공되었다면 피로 응력범주 B의 상세에 해당하기 때문에 피로강성이 상당히 높았을 것이나 X-cut 개선도 없고 부분용접되었기 때문에 훨씬 피로강성이 떨어지는 점선과 같은 응력범주의 상세가 되었음을 의미한다.



(그림 4-11) 응력범주 A~E 상세설계를 위한 응력변동위와 피로수명과의 관계곡선

4-5-4 등가 응력 변동 범위 (Equivalent Stress Range)

4-5-4-1 성수대교의 교통량

성수대교를 통과한 교통량에 대한 분석은 성수대교 피로수명과 관계가 있기 때문에 매우 중요한 사항이다. 교통량 분석을 통하여 강교의 피로수명에 영향을 주는 하중 사이클들을 가려내야 하며 각종차량의 총중량이 일정하지 않기 때문에 (Variable Amplitude Stress Range) 마이너 법칙(Miner's Rule)에 의한 등가 응력 변동 범위 (Equivalent Stress Range)도 산정해 내어야 한다. 다행하게도 성수대교에 대하여 서울시 교통관리 사업소와 서울지방 경찰청(1993년부터)에서 매년 교통량을 조사한 자료가 있어 종합하면 (표 4-8)과 같다.

성수대교를 통과한 모든 차량의 일 평균은 ADT(Average Daily Traffic)로서 (그림 4-12)에 나타나 있고, 이 ADT량은 성수대교를 통해 서울시로 들어오고 나가는 유입유출량의 합계를 한 값으로 일방향 통행량을 구하려면 이 값의 절반을 사용하여야 한다. 따라서 성수대교를 통과하는 모든 차량의 평균 대수는 일방향만 고려할 때 약 50000/Day가 된다고 할 수 있다. 이 ADT 전부가 피로손상을 주는 것은 아니고 대형버스, 대형트럭 및 특수차들만이 수직부재의 피로수명에 영향을 줄 만큼 큰 응력변화를 일으킨다.

이러한 현저한 응력변화를 주는 트럭의 교통량만의 평균을 일 평균 트럭교통량(ADTT: Average Daily Truck Traffic)이라고 하며 1980년부터 1994년 성수대교가 붕괴하기 까지의 ADTT를 종합하면 (표 4-9)와 같고 이것을 그림으로 제시하면 (그림 4-13)과 같다. 이 표의 교통량은 차량 종류별 일평균 통과 교통량을 조사한 자료를 가지고 365 일에 대한 값으로 환산한 것이다. 이러한 자료들은 통계적인 방법을 통하여 수집한 것들이기 때문에 일정한 오차를 포함하고 있음을 감안해야 한다.

(표 4-8) 성수대교 일 교통량

년 도	승용차	버 스			트 렉			특수차	총 계
		계	소 형	대 형	계	소 형	대 형		
1980	55,524	7,658	4,412	3,246	18,106	11,493	6,613	2,437	83,725
1981	59,254	8,172	4,709	3,463	19,322	12,265	7,057	2,601	89,349
1982	63,235	8,721	5,025	3,696	20,621	13,090	7,531	2,775	95,352
1983	67,484	9,307	5,363	3,944	22,006	13,969	8,037	2,962	101,759
1984	72,018	9,933	5,723	4,210	23,485	14,908	8,577	3,161	108,597
1985	59,775	9,169	5,283	3,886	15,528	9,857	5,671	1,822	86,294
1986	62,777	9,914	6,446	3,468	16,576	11,427	5,149	1,742	91,009
1987	65,779	10,660	7,609	3,051	17,625	12,997	4,628	1,662	95,726
1988	68,781	11,405	8,772	2,633	18,673	14,567	4,106	1,582	100,441
1989	64,752	8,873	7,057	1,816	13,023	10,225	2,798	1,014	87,662
1990	70,565	9,533	7,392	2,143	16,638	11,741	4,897	1,834	98,572
1991	72,784	9,134	6,895	2,239	18,745	15,501	3,244	1,327	101,990
1992	75,680	10,660	8,528	2,132	18,293	13,612	4,681	1,435	106,068
1993	75,937	10,696	8,557	2,139	18,355	13,658	4,697	1,440	106,428
1994	98,025	13,808	11,046	2,762	23,694	17,631	6,063	1,859	137,386

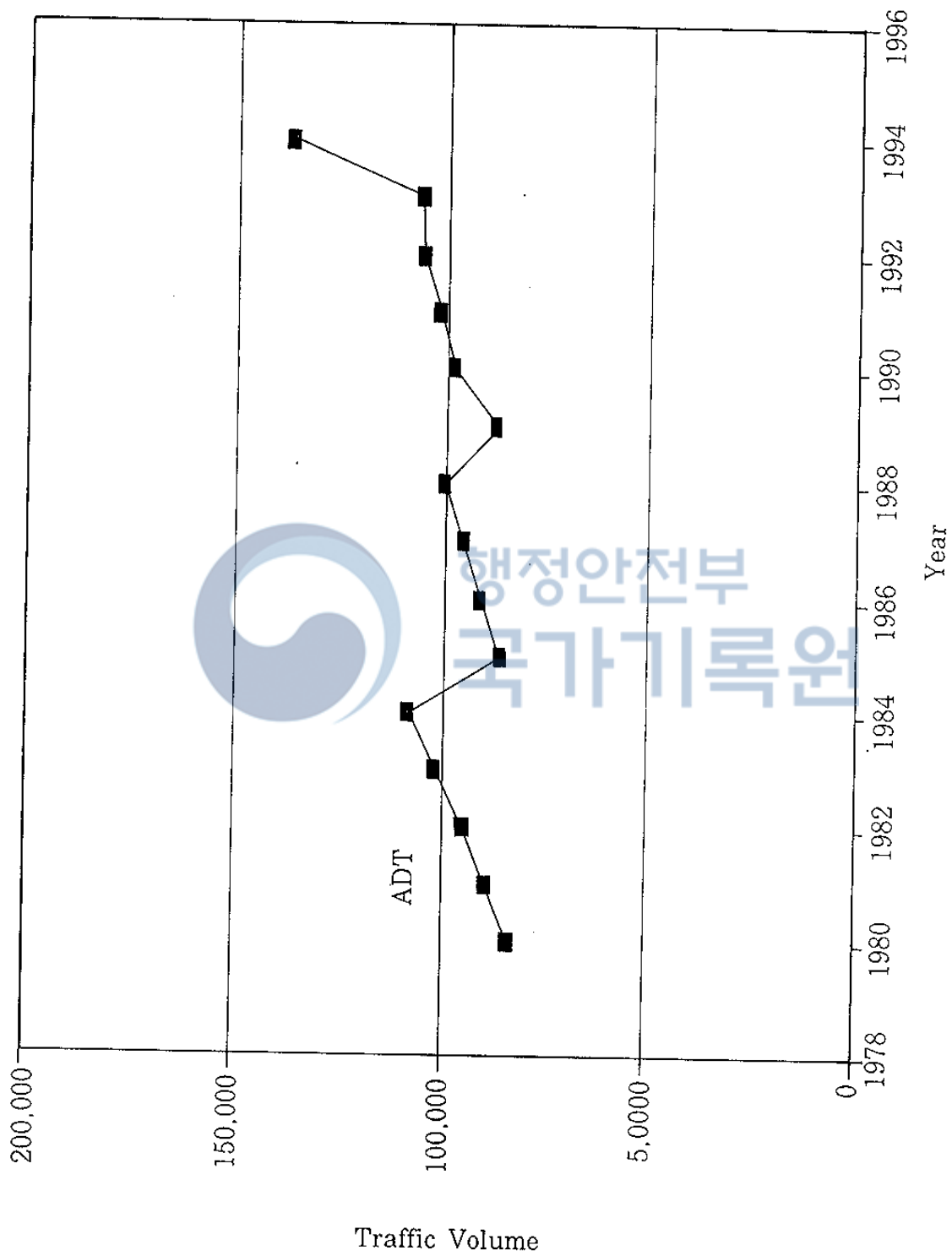
주) 1. 1980 - 1982, 1986-1987 교통량은 전후 교통량을 기준으로 추정한 교통량임
 2. 1993 - 1994 차량별 교통량은 1992 교통량 비율로 배분하였음

(표 4-9) Annual Truck Traffic Volume(ADTT)

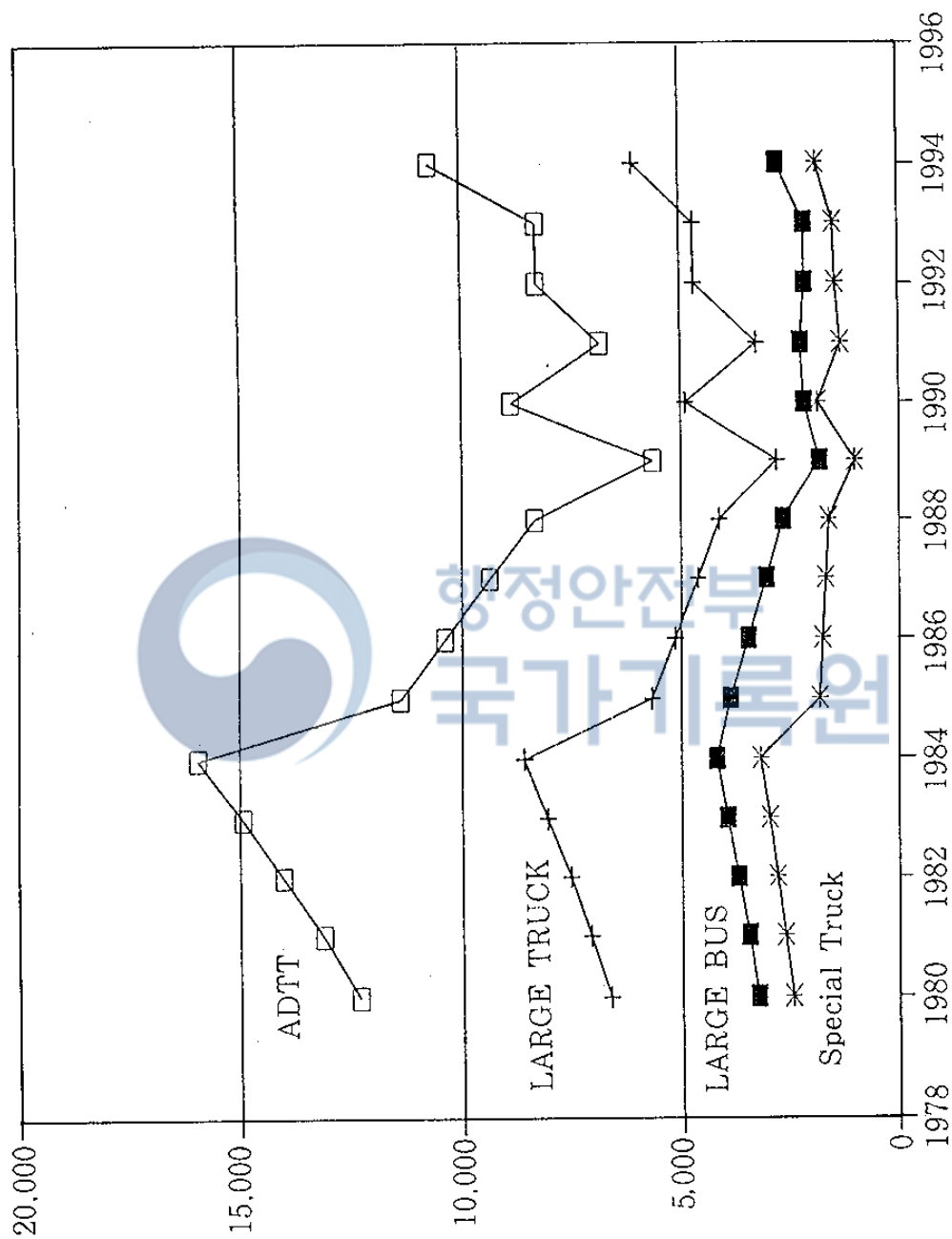
Year	Large Bus		Large Truck		Special Truck		Sum	
	/day	/year	/day	/year	/day	/year	/day	/year
1994	2,762	809,266	6,603	1,776,459	1,859	544,687	10,684	3,130,412
1993	2,139	780,735	4,697	1,714,405	1,440	525,600	8,276	3,020,740
1992	3,132	778,180	4,681	1,708,565	1,435	523,775	8,248	3,010,520
1991	2,239	817,235	3,244	1,184,060	1,327	484,355	6,810	2,485,650
1990	2,143	782,195	4,897	1,787,405	1,834	669,410	8,874	3,239,010
1989	1,816	662,840	2,798	1,021,270	1,014	370,110	5,628	2,054,220
1988	2,633	961,045	4,106	1,498,690	1,582	577,430	8,321	3,037,165
1987	3,051	1,113,615	4,628	1,689,220	1,662	606,630	9,341	3,409,465
1986	3,468	1,265,820	5,149	1,879,385	1,742	635,830	10,357	3,781,035
1985	3,886	1,418,390	5,671	2,069,915	1,822	665,030	11,379	4,153,335
1984	4,210	1,536,650	8,577	3,130,605	3,161	1,153,765	15,948	5,821,020
1983	3,944	1,439,560	8,037	2,933,505	2,962	1,081,130	14,943	5,454,195
1982	3,696	1,349,040	7,531	2,748,815	2,775	1,012,875	14,002	5,110,730
1981	3,463	1,263,995	7,057	2,575,805	2,601	949,365	13,121	4,789,165
1980	3,246	1,184,790	6,613	2,413,745	2,437	889,505	12,296	4,488,010
Sum	44,828	16,163,356	83,749	30,131,849	29,653	10,689,497	158,230	56,984,702
(%)		28.36		52.88		18.76		100.00

81.24%
Single Truck

18.76%
Semi-Trailer Truck



(그림4-12) 하루에 성수대교를 통과하는 총교통량(ADT)



(그림4-13) 성수대교의 일 평균트럭 교통량(ADTT)

4-5-4-2 대표 트럭 형상의 결정

성수대교에 피로손상을 주로 중차량(대형버스, 대형트럭 및 특수차)을
 응력계산을 위하여 단순한 통행트럭의 형상으로 일반화 시키는 것이 필요
 하다. 이 트럭 형상의 특성과 트럭 총 중량분포는 서울대학교 공학연구소
 에서 조사한 자료를 이용하였다. 이 연구에 의하면 트럭형태와 각 형태에
 대한 축간거리의 제원은 다음 (표 4-10)과 같이 4가지로 분류하였다.

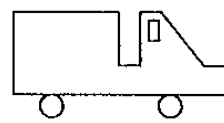
(표 4-10) 일반통행 트럭의 축중분포와 축간거리

트럭 형태	축 중 분 포			축간거리(m)
	앞 축	중 간 축	뒷 축	
ST 2	29.9%	-	70.1%	4.15
ST 3	18.5%	-	81.5%	4.32
ST 4	19.6%	33.0%	47.4%	3.45, 4.11
ST 5	12.3%	43.2%	44.5%	3.85, 5.09

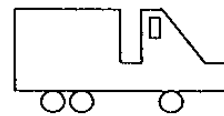
이 표에 분류된 일반적인 통행 트럭의 4가지 형상은 (그림 4-14)와 같으
 며 이들을 다시 Single Truck 과 Semi-Trailer Truck의 두가지 형태의
 대표트럭으로 단순화하고 트럭 중량의 축중 분포와 축간거리를 (그림 4-15)
 와 같이 결정하였다.

성수대교의 경우 대형버스와 대형트럭은 Single Truck으로, 특수차량
 을 Semi-Trailer Truck으로 분류하면 15년동안 양방향 총 트럭 통행량
 56,984,702 대중 81.24%인 46,295,205대가 ST2, ST3로 분류되는
 Single Truck이며, 18.76%인 10,689,497대가 STT4, STT5 모양의
 Semi-Trailer Truck이 된다. 이는 한강상 교량중 성수대교를 이용한 중

량초과 트럭이 많았던 점과 국내도로상 39개 지역에서의 Single Truck
과 Semi-Trailer 트럭의 통행비율이 각각 90.5%, 9.5%인 점을 감안하
면 크게 어긋남이 없다고 할 수 있다.



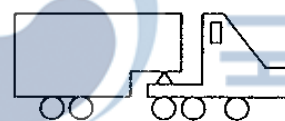
Two Axle
Single Truck(ST2)



Two Axle
Tractor Truck (ST3)

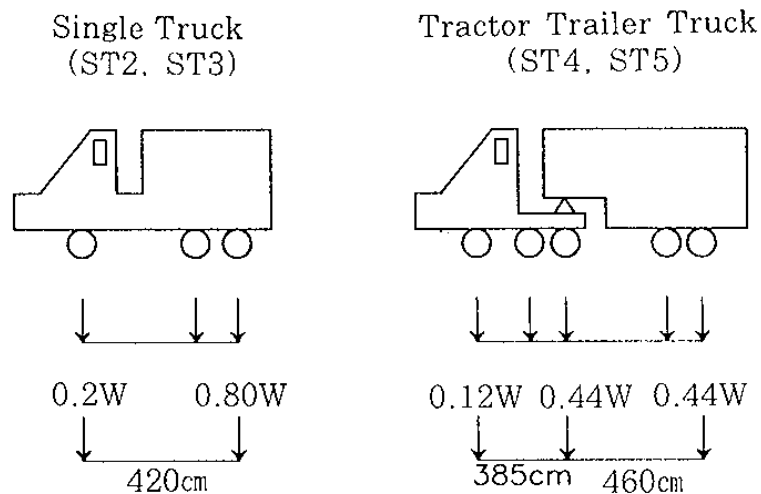


Four Axle Semi-
Tractor Trailer(ST4)



Four Axle Single
Tractor Trailer(ST5)

(그림 4-14) 국내 도로상을 통행하는 일반적인 트럭형상



(그림 4-15) 대표트럭의 형상

4-5-4-3 트럭의 총중량 분포 특성

전국 일반도로상을 통행하는 각종트럭을 대표트럭인 Single Truck과 Semi-Trailer 트럭으로 분류하여 총 8119대의 표본조사를 통해 트럭중량 분포를 조사한 트럭 중량 구간별비율은 (표 4-11)과 같고 이것을 히스토그램으로 나타낸 것이 (그림 4-16)이다. 이 표본조사에는 50 Ton이상의 트럭 통행빈도도 포함되어 있다.

이 도표를 기준으로 성수대교에 피로손상을 주며 15년동안 통과한 양방향을 합한 총 트럭 통행량 56,984,700대 중에서 81.24%인 Single Truck 46,295,205대와 18.76%인 Semi-Truck 10,689,497대를 각각 하중구간별로 구분한 결과는 (표 4-12)에 제시되어 있다. 즉 성수대교가 건설된 이후 15년 동안 이 교량을 통과한 총 트럭 통행량을 두가지 대표트럭으로 분류하고, 이렇게 분류된 대표트럭을 다시 트럭중량구간별 비율에 따른 트럭통행량으로 배분하였다. 대표트럭의 축중분포와 축간거리를 이용하면, 트럭중량구간별로 성수대교 수직부재에 작용하는 활하중의 효과를 산정하여 트럭중량구간별 피로손상 기여도를 구할 수 있다. Single Truck중에서 총 트럭중량이 10Ton 미만인 경우는 수직부재에 작용하는 수직력의 크기가 5.4Ton이며 응력으로 환산하면 23.6kg/cm^2 (Gross Area 기준)밖에 되지 않기 때문에 피로손상에 기여하지 않는 것으로 간주하여 제외하였다. 이렇게 하여 성수대교에 피로손상을 주는 트럭하중분포를 구한값이 (TWD Causing Fatigue Damage to Sung-Su Bridge) (표 4-12)에 산정되어 있다. 이 도표에 의하면 크게 또는 적게나마 성수대교에 피로손상을 준 양방향 총 트럭통행량은 약 37,300,000대로 추정된다.

4-5-4-4 과적차량이 미치는 영향

서울지방경찰청에서 도로교통법 제35조에 의거 적재제한 위반사항 단속 통계를 교량구분없이 서울시 전역에 걸친 전체자료로 제공한 것은 다음과 같다.

년도별	'90	'91	'92	'93	'94(10.30)	비 고
전 수	2,648	8,868	16,878	51,096	18,305	

한강상 전교량중에서 성수대교가 차지하는 차량통행율이 92년 6.7%, 93년 6.2% 인 점을 감안할때 위의 통계는 서울시 전역에 걸친 적재제한 위반차량의 경우이므로 이표에 발표된 위반차량 중에서 성수대교를 통과한 과적차량은 약 6.5%가 된다.

과적차량 위반 건수가 제일 많은 93년을 기준으로 볼 때 성수대교를 통과한 과적차량은 93년 한해동안 약 3168대가 되고 15년 동안에는 $3168 \times 15 = 47,520$ 대로서 (표 4-12)의 초과한계(Exceedence Limit)표에서 40ton이상 총트럭 통행량 578,788대의 약 8.2%이다. 이것은 과적차량의 약 8.2%만이 위반차량으로 검거되었거나 그렇지 않으면 본 보고서의 분석이 안전측으로 수행되었음을 의미한다. 위반차량의 적재중량을 구분한 (표 4-13)을 보면 총 중량 50ton 이상은 8% 밖에 되지않고 대부분은 축중위반의 경우로 52%를 차지한다. 이것은 다음절에서 등가응력 변동범위를 계산하여보면 그 영향이 매우 미소함을 알 수 있다.

(표 4-11) Traffic Survey Result

Truck weight Step(Ton)	Type of Truck			
	Single-Truck		Semi-Trailer	
	Trucks	Ratio(%)	Trucks	Ratio(%)
2 - 4	911	14.36		
4 - 6	590	9.30		
6 - 8	589	9.28		
8 - 10	612	9.64		
10 - 12	798	12.57	25	1.41
12 - 14	971	15.30	54	3.05
14 - 16	430	6.78	160	9.02
16 - 18	434	6.84	121	6.82
18 - 20	307	4.84	99	5.58
20 - 22	201	3.17	132	7.45
22 - 24	195	3.07	100	5.64
24 - 26	145	2.28	172	9.70
26 - 28	97	1.53	131	7.39
28 - 30	50	0.79	92	5.19
30 - 32	13	0.20	133	7.50
32 - 34	3	0.05	120	6.77
34 - 36			118	6.66
36 - 38			115	6.49
38 - 40			105	5.91
40 - 42			30	1.69
42 - 44			7	0.39
44 - 46			16	0.90
46 - 48			15	0.85
48 - 50			3	0.17
50 - 52			5	0.28
52 - 54			1	0.06
54 - 56			1	0.06
56 - 58			13	0.73
58 - 60			0	0.00
60 - 62			2	0.11
62 - 64			3	0.17
Sum	6346	100.00	1773	100.00
	78.16(%)		8119 21.84(%)	

(표 4-12) TRUCK WEIGHT DISTRIBUTION(TWD)

Estimated TWD
of Sung Su Bridge

TWD causing Fatigue Damage
to Sung Su Bridge

Exceedence Limit

Truck Weight Step (Ton)	Type of Truck		
	Ratio (%)	Single-Truck Trucks	Semi-Trailer Trucks
2 - 4	14.36	6645908	
4 - 6	9.30	4304156	
6 - 8	9.28	4296860	
8 - 10	9.64	4464649	
10 - 12	12.57	5821553	1.41
12 - 14	15.30	7083619	3.05
14 - 16	6.78	3136927	9.02
16 - 18	6.84	3166108	6.82
18 - 20	4.84	2239620	5.58
20 - 22	3.17	1466331	7.45
22 - 24	3.07	1422560	5.64
24 - 26	2.28	1057801	9.70
26 - 28	1.53	707632	7.39
28 - 30	0.79	364759	5.19
30 - 32	0.20	94837	7.50
32 - 34	0.05	21886	6.77
34 - 36			6.66
36 - 38			6.49
38 - 40			5.92
40 - 42			1.69
42 - 44			0.39
44 - 46			0.90
46 - 48			0.85
48 - 50			0.17
50 - 52			0.28
52 - 54			0.06
54 - 56			0.06
56 - 58			0.73
58 - 60			0.00
60 - 62			0.11
62 - 64			0.17
Sum	100.00	46295205	100.00
			(%)
			10689497
			56984702

Truck Weight Step (Ton)	Type of Truck		
	Ratio (%)	Single-Truck Trucks	Semi-Trailer Ratio (%)
2 - 4			
4 - 6			
6 - 8			
8 - 10			
10 - 12	15.62	5821553	150726
12 - 14	19.00	7083619	325568
14 - 16	8.42	3136927	964647
16 - 18	8.49	3166108	729514
18 - 20	6.01	2239620	596875
20 - 22	3.93	1466331	795834
22 - 24	3.82	1422560	602905
24 - 26	2.84	1057801	1036996
26 - 28	1.90	707632	789805
28 - 30	0.98	364759	554672
30 - 32	0.25	94837	801863
32 - 34	0.06	21886	723485
34 - 36			711427
36 - 38			693340
38 - 40			633050
40 - 42			180871
42 - 44			42203
44 - 46			96465
46 - 48			90436
48 - 50			18087
50 - 52			30145
52 - 54			6029
54 - 56			6029
56 - 58			78378
58 - 60			0
60 - 62			12058
62 - 64			18087
Sum	71.32	26583632	10689497
	(%)		37273129
			(%)
			28.68

Type of Truck		Truck Weight (Ton)
Single Truck	Semi- Trailer	
		2
		4
		6
		8
		10
26583632	10689497	
20762079	10538771	
13678460	10213202	
10541533	9248555	
7375426	8519041	
5135806	7922165	
3669475	7126331	
2246915	6523427	
1189114	5486431	
481482	4696626	
116723	4141954	
21886	3340091	
	2616606	
	1905178	
	1211838	
	578788	
	397917	
	355714	
	259249	
	168813	
	150726	
	120581	
	114552	
	108523	
	30145	
	30145	
	18087	
		62

(표 4-13) 중량별 과적트럭 단속 자료

A 지역 : 의정부 국도유지

B 지역 : 수원 국도유지

C 지역 : 경기도 도로관리

과적트럭 하중구간 (Tons)	위 반 차 량 대 수					비 고
	A 지 역	B 지 역	C 지 역	합 계	(%)	
24~26						↑ 축 중 위 반 (52%) ↓
26~28						
28~30	2		1	3	12	
30~32	2	2		4	16	
32~34		1		1	4	
34~36		2	2	4	16	
36~38						
38~40	1			1	4	↑ 총 중 량 위 반 (48%) ↓
40~42						
42~44	1			1	4	
44~46	2	1	1	4	16	
46~48	1	2		3	12	
48~50		2		2	8	
50~52						
52~54						
54~56	1			1	4	
56~58		1		1	4	
58~60						
계	10	11	4	25	100	

4-5-4-5 등가응력 변동범위(Equivalent Constant Stress Range)와

하중 싸이클 횟수

성수대교를 통과한 총중량 10ton 以上の 대표트럭들이 수직부재에 발생시키는 인장력과 이로인해 발생하는 인장응력을 구하여 교통량 분포 Data에 따라 Histogram을 작성할 수 있다. 이때 수직부재에 발생하는 인장력은 5장에서 작성한 3차원 구조해석용 모델의 수치해석을 통하여 계산된 중앙 수직부재의 영향면(Influence Surface) 값을 이용하여 산정할 수 있다. 본 보고서에서 이용한 성수대교 중앙 수직부재의 영향면과 그의 등고선을 Computer Graphic으로 처리하여 (그림 4-17)을 작성하였다. 각 트럭 중량단계의 중앙값으로 수직부재의 인장력(P_i Tons)과 인장응력(S_i kg/cm²)을 산정하고 통행량의 백분율(r_i %)을 알면 등가인장력 또는 등가 인장응력의 변동 범위는

$$P_{re} = \sqrt[3]{\sum r_i P_i^3} : \text{등가 인장력 범위}$$

또는

$$S_{re} = \sqrt[3]{\sum r_i S_i^3} : \text{등가인장응력 범위}$$

로 구할 수 있다.

이것은 무작위로 변화하는 교통량에 의한 인장력 또는 인장응력변동범위(Random Variable Stress Range)에 의한 피로손상을 마이너의 선형피로 법칙(Miner's Linear Fatigue Damage Rule)에 따라 등가(等價)의 일정한 응력변동범위(Equivalent Constant Stress Range)로 치환시켜 놓고 피로손상의 해석을 용이하게 함에 있다.

이러한 방법에 의해 성수대교의 수직부재에 작용한 등가응력 변동 범위 (等價應力常振幅)는 교량상에 중트럭 한대만 있다고 가정했을때는 12.7 Ton 또는 98.2kg/cm^2 이며, 수직부재에 최대응력이 작용하도록 4차선 교폭에 한차선에 1대씩 재하했을 경우는 31.6 Ton 또는 244.8kg/cm^2 으로서 (표 4-14)와 (표4-15)에 계산과정이 수록되어 있다. 이 인장응력범위는 부분용접된 단면적만 유효하다고 가정하고 이 부분용접된 곳의 순단면적으로 계산된 값이다. 이 자료를 기초로 하여 작성한 성수대교 중앙수직재에 작용하는 교통량에 따른 응력분포는 (그림 4-18)과 같다.



행정안전부
국가기록원

(표 4-14) 트럭 한대만 교량상에 등가응력 변동범위

Gross Area (Full Penetration Weld) 227.4 cm²
 Net Area (Partial Penetration Weld) 129 cm²

Semi-Trailer Truck							
Load Step (Tons)	Mean Volume (Tons)	Axial Force of Vertical p (Tons)	Full Penetration (kg/cm ²)	Partial Penetration S (kg/cm ²)	Volume Ratio r (%)	$r \cdot P^3/100$	$r \cdot S^3/100$
10 - 12	11	5.98	26.31	46.39	0.40	0.87	403.64
12 - 14	13	7.07	31.10	54.82	0.87	3.09	1439.14
14 - 16	15	8.16	35.88	63.26	2.59	14.06	6550.49
16 - 18	17	9.25	40.67	71.69	1.96	15.48	7211.28
18 - 20	19	10.34	45.45	80.12	1.60	17.68	8237.14
20 - 22	21	11.42	50.24	88.56	2.14	31.83	14829.01
22 - 24	23	12.51	55.02	96.99	1.62	31.68	14759.23
24 - 26	25	13.60	59.81	105.43	2.78	69.98	32600.84
26 - 28	27	14.69	64.59	113.86	2.12	67.14	31278.28
28 - 30	29	15.78	69.38	122.29	1.49	58.43	27218.37
30 - 32	31	16.86	74.16	130.73	2.15	103.18	48063.68
32 - 34	33	17.95	78.94	139.16	1.94	112.30	52312.24
34 - 36	35	19.04	83.73	147.60	1.91	131.75	61371.45
36 - 38	37	20.13	88.51	156.03	1.86	151.69	70661.57
38 - 40	39	21.22	93.30	164.47	1.70	162.19	75555.03
40 - 42	41	22.30	98.08	172.90	0.49	53.84	25081.48
42 - 44	43	23.39	102.87	181.33	0.11	14.49	6751.24
44 - 46	45	24.48	107.65	189.77	0.26	37.97	17686.33
46 - 48	47	25.57	112.44	198.20	0.24	40.55	18891.44
48 - 50	49	26.66	117.22	206.64	0.05	9.19	4281.44
50 - 52	51	27.74	122.01	215.07	0.08	17.27	8045.64
52 - 54	53	28.83	126.79	223.50	0.02	3.88	1805.96
54 - 56	55	29.92	131.57	231.94	0.02	4.33	2018.22
56 - 58	57	31.01	136.36	240.37	0.21	62.69	29204.39
58 - 60	59	32.10	141.14	248.81	0.00	0.00	0.00
60 - 62	61	33.18	145.93	257.24	0.03	11.82	5506.81
62 - 64	63	34.27	150.71	265.67	0.05	19.53	9099.62
Sum					28.68	1246.93	580863.95
Single Truck							
2 - 4	3	1.79	7.86	13.86			
4 - 6	5	2.98	13.10	23.10			
6 - 8	7	4.17	18.35	32.34			
8 - 10	9	5.36	23.59	41.58			
10 - 12	11	6.56	28.83	50.82	15.62	44.01	20501.74
12 - 14	13	7.75	34.07	60.06	19.00	88.40	41177.41
14 - 16	15	8.94	39.31	69.30	8.42	60.13	28012.51
16 - 18	17	10.13	44.56	78.54	8.49	88.35	41157.24
18 - 20	19	11.32	49.80	87.78	6.01	87.25	40645.17
20 - 22	21	12.52	55.04	97.02	3.93	77.13	35930.54
22 - 24	23	13.71	60.28	106.26	3.82	98.31	45796.03
24 - 26	25	14.90	65.52	115.50	2.84	93.88	43731.84
26 - 28	27	16.09	70.77	124.74	1.90	79.11	36852.99
28 - 30	29	17.28	76.01	133.98	0.98	50.53	23538.23
30 - 32	31	18.48	81.25	143.22	0.25	16.05	7475.46
32 - 34	33	19.67	85.49	152.47	0.06	4.47	2081.00
Sum					71.32	787.62	366900.16

Semi-Trailer 1246.93 580863.95
 Single Truck 787.62 366900.16

Sum 2034.55 947764.11
 Sr eq. 12.67 98.23
 (Ton) (kg/cm²)

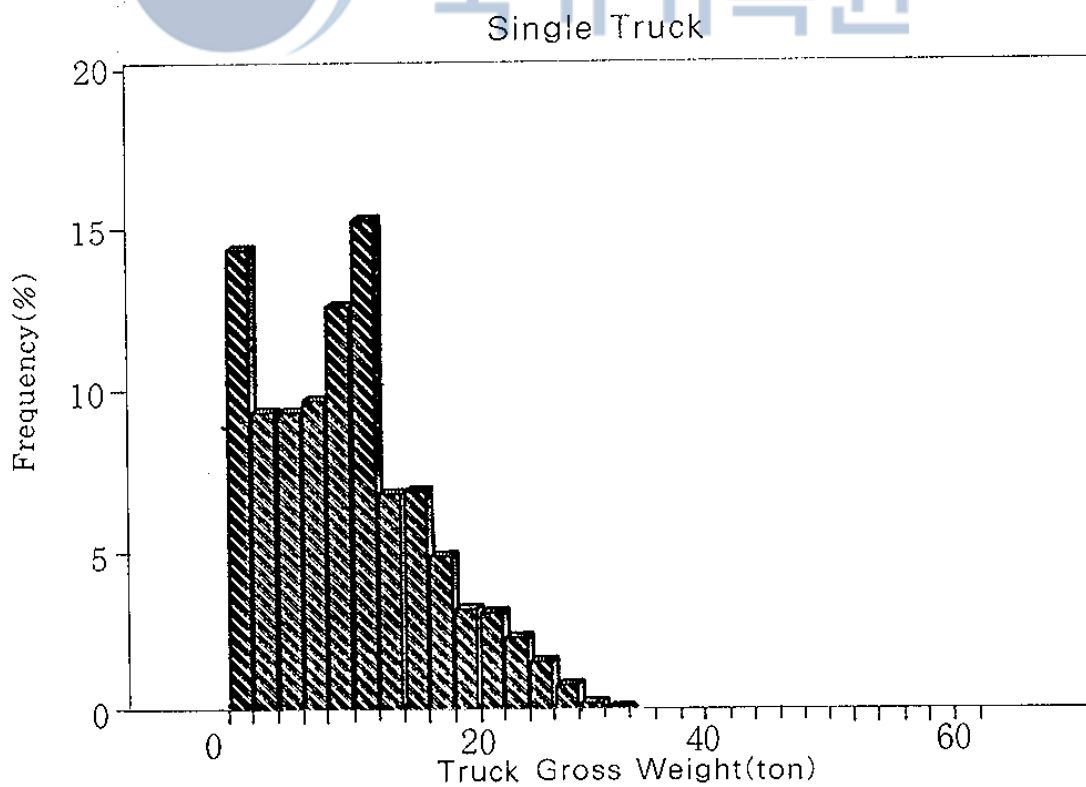
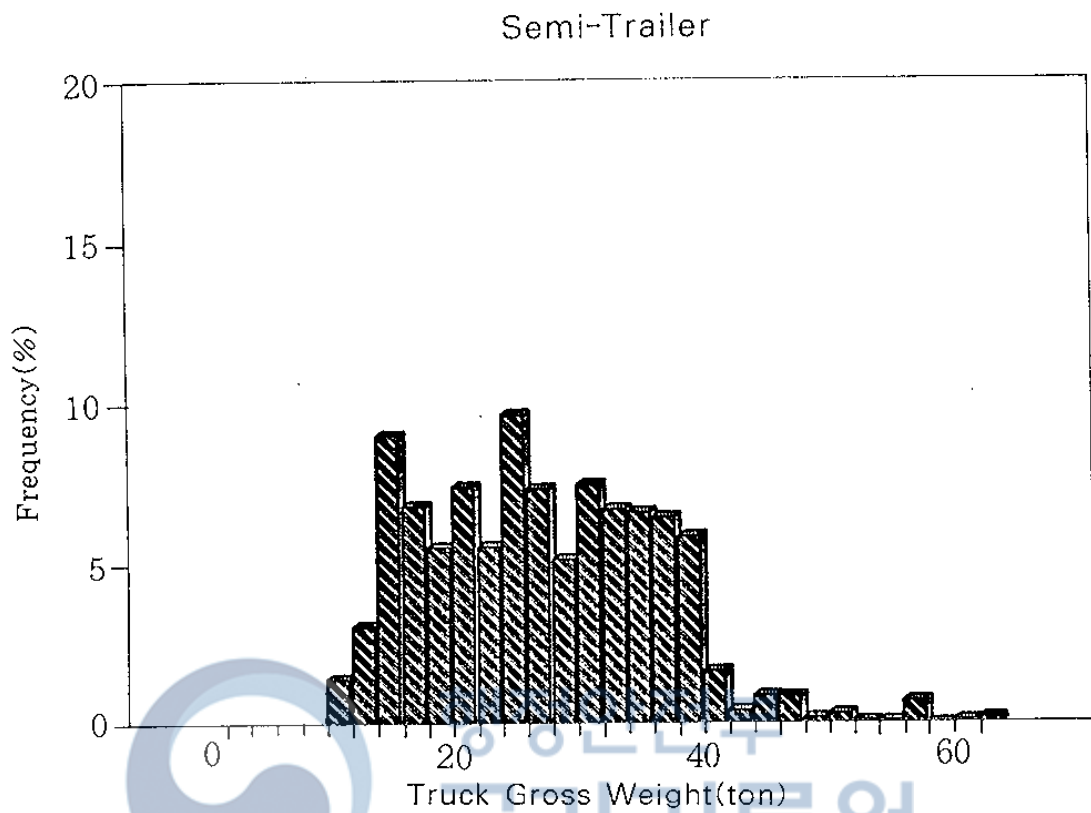
(표 4-15) 각 차선에 1대씩 4차선 교량에 재하되었을때 등가응력 변동범위

Gross Area (Full Penetration Weld) 227.4 cm²
Net Area (Partial Penetration Weld) 129 cm²

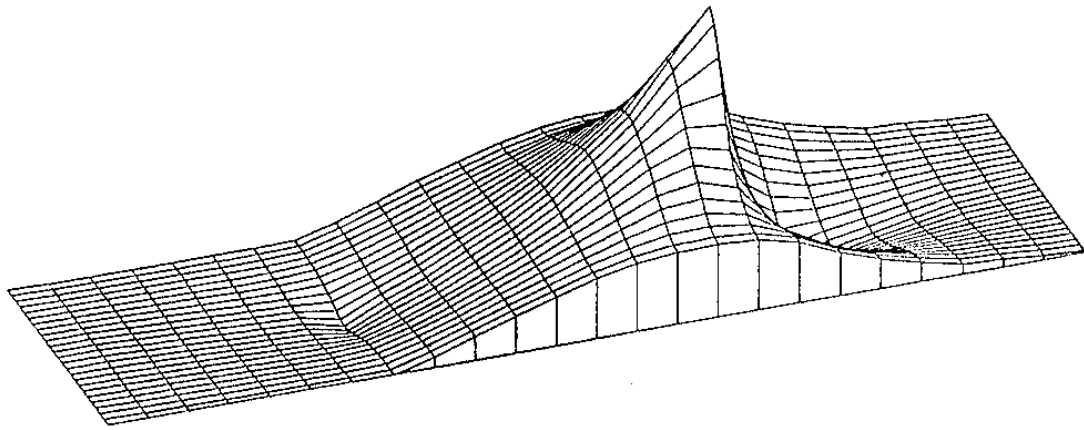
Semi-Trailer Truck							
Load Step (Tons)	Mean Volume (Tons)	Axial Force of Vertical p (Tons)	Full Penetration (kg/cm ²)	Partial Penetration S (kg/cm ²)	Volume Ratio r (%)	r*P ³ /100	r*S ³ /100
10 - 12	11	14.98	65.88	116.14	0.40	13.60	6334.80
12 - 14	13	17.71	77.86	137.26	0.87	48.49	22585.97
14 - 16	15	20.43	89.84	158.37	2.59	220.69	102803.67
16 - 18	17	23.15	101.82	179.49	1.96	242.95	113174.09
18 - 20	19	25.88	113.80	200.60	1.60	277.51	129273.91
20 - 22	21	28.60	125.78	221.72	2.14	499.59	232726.96
22 - 24	23	31.33	137.76	242.84	1.62	497.24	231631.91
24 - 26	25	34.05	149.74	263.95	2.78	1098.33	511638.66
26 - 28	27	36.77	161.72	285.07	2.12	1053.77	490882.40
28 - 30	29	39.50	173.69	306.19	1.49	916.99	427166.02
30 - 32	31	42.22	185.67	327.30	2.15	1619.28	754313.01
32 - 34	33	44.95	197.65	348.42	1.94	1762.41	820990.14
34 - 36	35	47.67	209.63	369.53	1.91	2067.62	963165.72
36 - 38	37	50.39	221.61	390.65	1.86	2390.60	1108965.13
38 - 40	39	53.12	233.59	411.77	1.70	2545.46	1185763.28
40 - 42	41	55.84	245.57	432.88	0.49	845.00	393629.56
42 - 44	43	58.57	257.55	454.00	0.11	227.45	105954.23
44 - 46	45	61.29	269.53	475.12	0.26	595.86	277569.92
46 - 48	47	64.01	281.50	496.23	0.24	636.46	296482.94
48 - 50	49	66.74	293.48	517.35	0.05	144.24	67193.05
50 - 52	51	69.46	305.46	538.47	0.08	271.06	126268.61
52 - 54	53	72.19	317.44	559.58	0.02	60.84	28342.78
54 - 56	55	74.91	329.42	580.70	0.02	67.99	31674.00
56 - 58	57	77.63	341.40	601.81	0.21	983.90	458334.76
58 - 60	59	80.36	353.38	622.93	0.00	0.00	0.00
60 - 62	61	83.08	365.36	644.05	0.03	185.53	86424.00
62 - 64	63	85.81	377.34	665.16	0.05	306.57	142809.72
Sum					28.68	19569.43	9116099.24
Single Truck							
2 - 4	3	4.42	19.45	34.28			
4 - 6	5	7.37	32.41	57.13			
6 - 8	7	10.32	45.37	79.98			
8 - 10	9	13.27	58.34	102.84			
10 - 12	11	16.21	71.30	125.69	15.62	665.75	310130.42
12 - 14	13	19.16	84.27	148.54	19.00	1337.16	622891.93
14 - 16	15	22.11	97.23	171.40	8.42	909.65	423746.03
16 - 18	17	25.06	110.19	194.25	8.49	1336.50	622586.80
18 - 20	19	28.01	123.16	217.10	6.01	1319.87	614840.68
20 - 22	21	30.95	136.12	239.95	3.93	1166.77	543522.29
22 - 24	23	33.90	149.09	262.81	3.82	1487.14	692757.97
24 - 26	25	36.85	162.05	285.66	2.84	1420.11	661532.89
26 - 28	27	39.80	175.01	308.51	1.90	1196.73	557476.34
28 - 30	29	42.75	187.98	331.36	0.98	764.36	356063.46
30 - 32	31	45.69	200.94	354.22	0.25	242.75	113081.57
32 - 34	33	48.64	213.91	377.07	0.06	67.58	31479.40
Sum					71.32	11914.36	5550109.78

Semi-Trailer 19569.43 9116099.24
Single Truck 11914.36 5550109.78

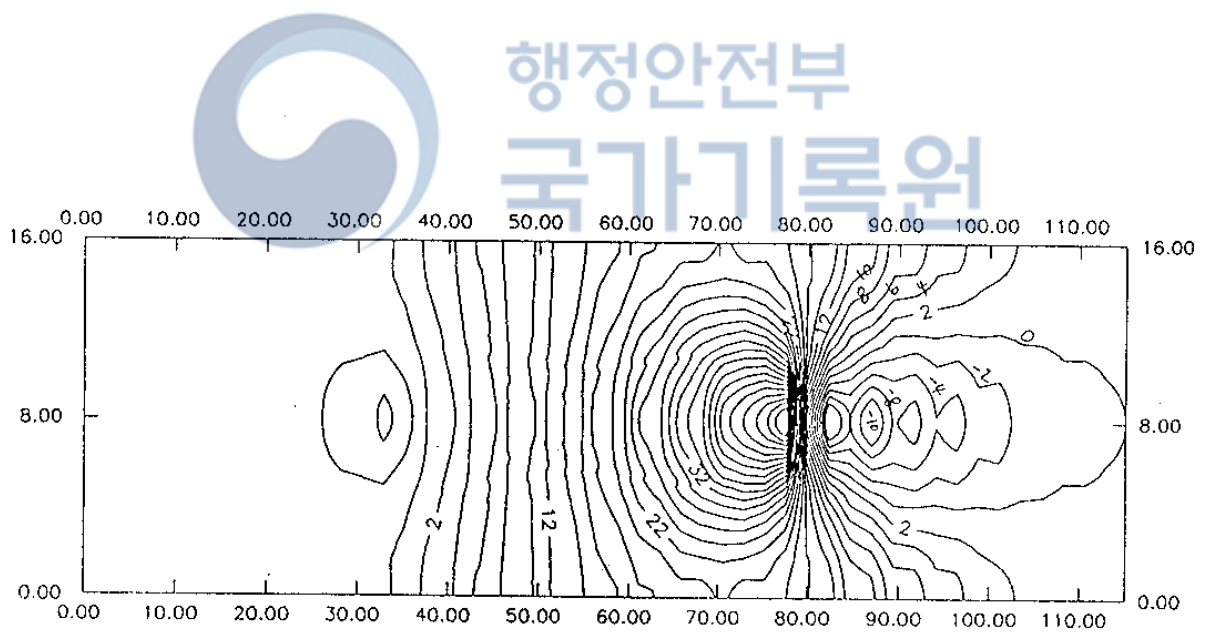
Sum 31483.79 14666209.03
Sr eq. 31.58 244.78
(Ton) (kg/cm²)



(그림 4-16) 대표트럭의 중량 분포

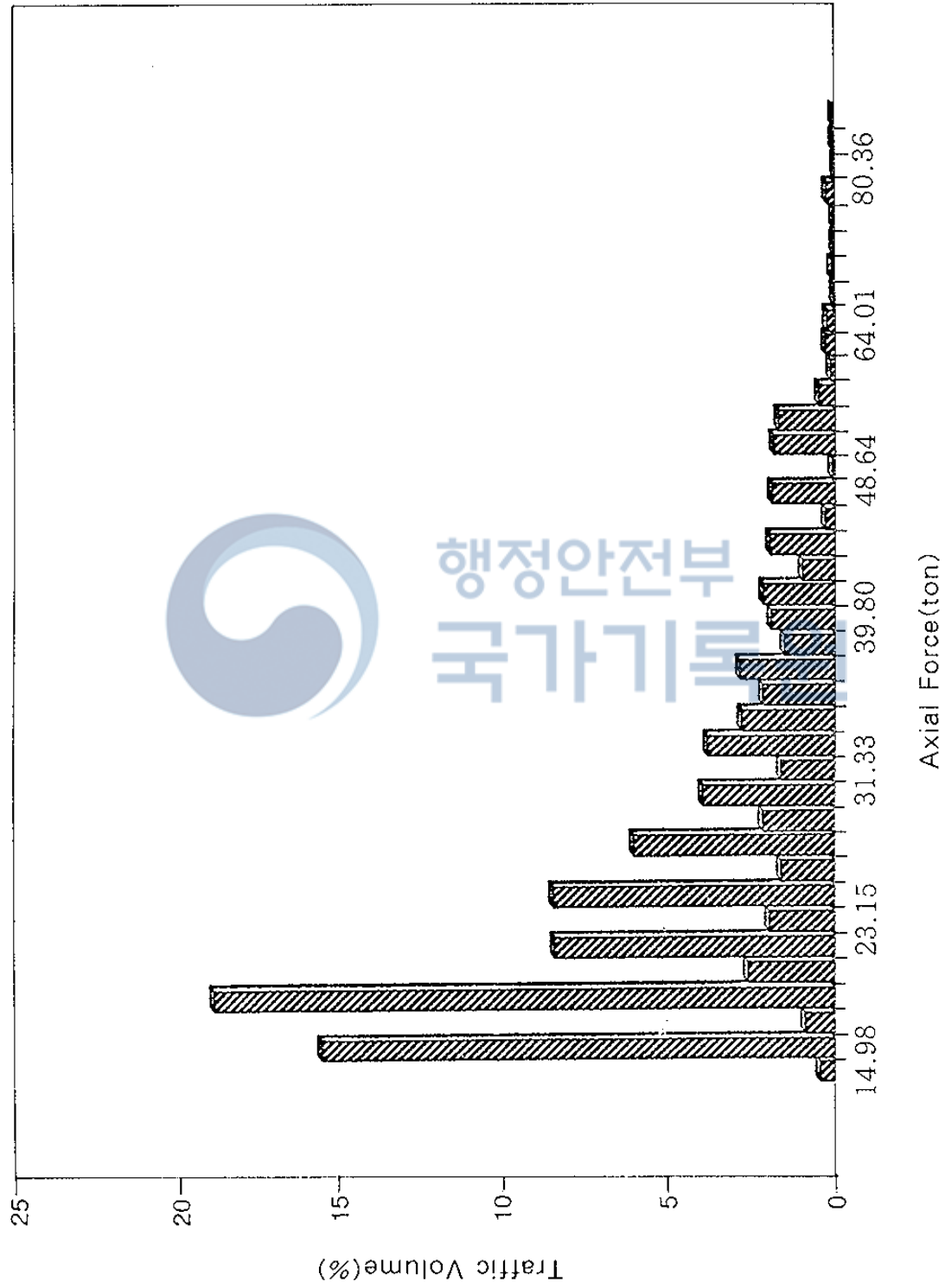


영향면



영향면의 등고선

(그림 4-17) 중앙수직부재의 영향면과 영향면의 등고선



(그림 4-18) Force - Traffic Distribution

성수대교가 준공된 이후 이 교량에 대한 내하력 검사나 안정성 평가가 없었고 갑자기 붕괴사고가 났기 때문에 활하중에 의한 응력실측자료는 없지만 설계응력변동 범위와 교통량 분석에 의해 추정이 가능하다. 설계 활하중은 DL-18 하중으로서 충격하중을 포함한 최대 설계 활하중 응력을 구하면 다음과 같다.

$$\max. \sigma_{LL+I} = \frac{58.6\text{ton}}{227.4\text{cm}^2} = 0.258 \text{ ton/cm}^2 = 258 \text{ kg/cm}^2$$

성수대교를 통과하는 일 트럭통행량을 전국 교통분포와 비슷하다고 보면 유효 활하중 응력변동범위는,

$$\begin{aligned} S_{r \text{ miner}} &= \alpha \cdot \phi \cdot S_{rd} \\ &= (0.5)(0.705)(258) \\ &= 90.9 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

로서 앞절의 교통량 분석에서 교량상에 한대의 트럭이 통과할 때, 제시된 값인 98.23kg/cm²와 크게 다르지 않다. 따라서 Miner의 법칙에 의한 유효 응력 변동범위는 α 값을 0.5로 잡았을때 약 91kg/cm²라고 할 수 있다. 한대의 트럭이 교량을 통과할 때 수직부재에 발생시키는 응력횟수를 한 사이클이라고 보면 앞절에서 수행한 교통량분석에 의하면 15년동안 성수대교에 피로 영향을 주었던 총 트럭 통행량은 3,730萬대로서 작용응력 횟수는 37.3 million Random Variable Stress Cycles라고 할 수 있다. 이 자료로부터 일방향 일일 평균트럭통행량을 구하여 보면 다음과 같다.

$$ADTT = \frac{37,300,000}{(2)(365)(15)} = 3406$$

4-5-5. 피로시험의 의미와 성수대교의 피로수명

4-5-5-1 수직재의 피로수명 계산

응력 변동폭을 일정하게 작용하여 피로시험을 수행하였을 때 Paris-Erdogan 지수법칙(Power law)에 의하면 피로수명과 응력변동과의 관계는 다음 식으로 나타내 진다.

$$N = A \cdot S_r^{-m}$$

N : 피로수명 (하중 사이클수)

Sr : 응력 변동범위

m : 재료의 성질에 따라 결정되는 지수

A : 구조상세부의 피로거동에 의해 결정되는 상수

구조용강재와 같은 軟鋼의 경우 S-N圖의 기울기에 해당하는 m의 값은 일반적으로 3.0으로 취한다.

이러한 분석은 다음과 같은 두 가지 점에 유의하여야 한다.

- 1) 실제로 피로시험에서 한 수직부재에 작용한 수직력은 한가지이므로 설계식과의 비교를 위해서는 이 수직력을 쏘단면적(Gross-Sectional Area)으로 나눈 공칭응력(Nominal Stress)을 사용하여야 한다. 국부적인 응력의 변화는 구조물의 상세 즉 국부적인 조건(Local Condition)에 의해 결정되기 때문에 낮은 공칭응력이 작용해도 설계 또는 시공이 잘못되면 실제로는 높은 응력이 작용하게 되어 피로강성이 저하된다. 만약에 수직력을 순단면적(Net-Sectional Area)으로 나눈 순응력(Net Stress)을 사용하면 전 단면적으로 나눈 공칭응력보다 같은 크기의 수직력에 대해, 응력의 값이 크게 산출되며 이 응력(S_r) 값을 위 식에 대입하여 A값을 구하면, $A = N \cdot S_r^m$ 이므로 피로저항이 적은 상세가 큰 값의 A를 갖게 되는 모순을 낳게 된다. 이것은 마치 결함이 있는 부재가 (그 결함 때문에 높은 Local Stress가 작용함

에도 불구하고) 높은 피로응력을 견디어 낸 것처럼 잘못 해석되어 결과적으로 S-N curve가 위쪽으로 치우치게 되어 설계시 공칭응력(Nominal Stress)을 기준으로 하는 것과 맞지 않게 된다.

- 2) 교폭이 2차선 이상인 교량에 여러 대의 트럭을 여러 차선에 한꺼번에 재하시키는(Multiple presence of truck) 경우는 응력 변동범위는 약간 증가 시키지만 응력반복횟수를 감소시키기 때문에 이러한 多車線載荷 효과를 무시하는 것이 오히려 안전측에 있게 된다. 통계적으로 보면 동시에 주행하는 트럭이라 하더라도 대부분 1.5초 이상씩 시간차가 있기 때문에 등가응력범위는 조금밖에 증가시키지 못한다. 그러나 차량통행량을 차선 수만큼 나누어야 하기 때문에 응력반복 횟수를 크게 감소시키게 된다.
- 3) 미국 AASHTO 피로 기준이나 대한민국 건설부 도로교시방서에서, 피로설계시 허용응력범위(Allowable Stress Range)를 선택하는 기준의 하나로서, 특정교량이 놓이는 도로의 교통량조사가 있는 경우는, 설계식을 사용하여 허용응력범위를 구하여야 한다. 만약, 교통량 조사가 없을 때에는 고속도로, 국도 및 주간선도로의 일평균 트럭통행량(ADTT)이 2500대 이상의 경우는 트럭하중은 200만 싸이클, 차선하중은 50만 싸이클, 2500대 이하의 경우는 트럭하중은 50만 싸이클, 차선하중은 10만 싸이클에 해당하는 허용응력범위값을 설계값으로 하도록 규정하였다. 이것은 허용응력범위를 선택하기 위한 하나의 구분이지 트럭교통량의 설계기준은 아니기 때문에 앞에서 산정한 N값을 $2500 \times 365(\text{日})$ 의 값으로 나누어서 기대피로 파괴년한을 구할 수 없다.

※ ADTT란 Average Daily Truck Traffic의 약자로서 미국 AASHTO 피로기준이나 건설부 도로교 시방서에서 피로설계시 활하중의 최대응력 범위를 결정할 경우에 특정한 교량의 교통량 조사가 없을 때는 (표 2-1)에 제시한 대로 그 교량이 위치한 고속도, 국도 및 간선도로상 일평균 트럭교통량을 기준으로 해서 ADTT가 2500대 이상인 경우는 ADTT가 얼마가 되든지 트럭 하중으로 설계할 때는 특정상세의 피

로범위(Fatigue Category)의 200만 사이클에 해당하는 허용응력 범위를, 차선하중에 대하여는 50만 사이클에 해당하는 허용응력 범위를 설계값으로 이용하라는 것이며, 이 ADTT 2500대가 50년 동안 200만 사이클의 기준이 된다는 의미는 아니다. 그 교량이 위치한 도로의 ADTT가 2500대 미만인 경우도 ADTT가 얼마나 적던지 간에 트럭하중에 대하여는 50만 사이클, 차선하중에 대하여는 10만 사이클에 해당하는 허용응력 범위를 피로설계의 기준값으로 사용하라는 의미이다.

※ 도로교표준시방서(건설부 1992년 발행) 부록 C 허용피로응력범위(594쪽~603쪽)

허용피로응력범위

반복응력을 받는 부재와 이음부의 설계시 최대응력이 2.1에서부터 2.3에 규정한 기본허용응력을 초과하지 않아야 한다. 또한, 응력범위는(표 C·1·1)에 규정된 허용피로응력 범위를 초과하지 않아야 한다.

(표 C·1·1) 허용피로응력 범위

다재하경로구조물 ¹⁾				
응력범주 (표 2-4-2)참조	허용응력범위, σ_{sr} (kg/mm ²) ³⁾			
	10만회	50만회	2백만회	2백만회 이상
A	44.2	26.0	16.8	16.8
B	34.4	20.3	12.6	11.2
B'	27.4	16.1	10.1	8.4
C	25.0	14.7	9.1	7.0
				8.4 ⁴⁾
D	19.6	11.2	7.0	4.9
E	15.4	9.1	5.6	3.1
E'	11.2	6.4	4.0	1.8
F	10.5	8.4	6.3	5.6

단재하경로구조물 ²⁾				
응력범주 (표 2-4-2)참조	허용응력범위, σ_{sr} (kg/mm ²) ³⁾			
	10만회	50만회	2백만회	2백만회 이상
A	35.1	20.3	16.8	16.8
B	27.4	16.1	11.2	11.2
B'	21.8	12.6	7.7	7.7
C	19.6	11.2	7.7	7.7
			8.4 ⁴⁾	7.7 ⁴⁾
D	15.4	9.1	5.6	3.5
E ⁵⁾	11.9	7.0	4.2	1.6
E'	8.4	4.9	2.8	0.9
F	8.4	6.3	4.9	4.2

- 주: 1) 한 부재의 파괴로 인하여 전체적인 파괴가 일어나지 않는 구조물.
 2) 한 부재의 파괴만으로 전체 구조가 붕괴되는 구조물.
 3) 응력범위는 최대응력과 최소응력과의 대수차를 의미한다. 인장응력은 압축응력과 부호가 반대한다.
 4) 돌보 북부판과 플랜지의 수직보강재 용접의 경우.
 5) 단재하경로구조물의 경우 플랜지 두께가 2cm 이상이면 부분용접한 덮개판을 사용하지 않는다.

하중 반복회수

(1) 설계시 최대응력범위의 반복회수는 교통량과 하중조사 및 특별한 고려사항이 없으면 표 C·2·1에 따른다.

(2) 허용피로응력은 활하중이나 풍하중을 포함하는 하중조합에 대해 적용한다.

(표 C·2·1) 응력 반복회수

주부재(종방향)			
도로의 종류	ADTT ¹⁾	트럭하중	차선하중 ²⁾
고속도로, 국도 및 주간선도로	2,500이상	2백만 ³⁾	5십만
경우Ⅱ에 포함되지 않는 기타 도로	2,500이하	5십만	10만
경우 Ⅱ에 포함되지 않는 기타 도로		10만	10만

축하중을 받는 횡방향 부재와 구조상세부재

도로의 종류	ADTT ¹⁾	트럭하중
고속도로, 국도 및 주간선도로	2,500이상	2백만이상
	2,500이하	2백만
기타 도로		5십만

주 : 1) 일평균트럭교통량(1방향)

2) 종방향 부재는 차선하중에 대하여 반드시 검토해야 한다.

3) 1대의 트럭만을 교량에 통과시켜 발생되는 응력범위에 대해서는 "2백만 이상"의 응력반복회수에 대하여 검토한다.

그렇다면 가장 표준이 되는 경우의 기대피로 파기년한은,

$$N = 2,000,000 \text{ 사이클에서}$$

$$Y_e = \frac{2,000,000}{2,500 \times 365(\text{日})} = 2.19(\text{年})$$

되므로 실제와 크게 맞지 않게 된다.

미국철도 기술자 연합회(AREA, American Railway Engineers Association)의 시방서의 피로기준은 허용응력범위를 선택하는 기준으로 기차의 통행량을 사용하지 않고 교량 경간의 길이를 사용했다는 것은 ADTT 2500대가 설계기준 교통량은 아니라는 것을 설명해준다.

한국기계 연구원에서 실험한 성수대교 수직부재 모의 피로실험 결과의 의미를 이러한 금속피로의 지수법칙을 가지고 다음과 같이 고려해 볼 수 있다. 피로실험의 첫 번째 시험체와 같이 DL-18 하중에 해당하는 응력변동 범위 (Sr) 257.7kg/cm^2 를 작용시켰을 때(그림 4-11)의 점 "A"의 피로수명이 2.56×10^6 이었으므로, $\log(2.56 \times 10^6) = \log A_1 - 3\log(257.7)$

$$\therefore A_1 = 4.3811 \times 10^{13}$$

DL-24 에 대한 응력변동폭 342.7kg/cm^2 를 작용시킨 세 번째 시험체의 경우 (그림 4-11)의 점 "B"는 피로수명이 9.93×10^5 이었으므로 ,

$$\log(9.93 \times 10^5) = \log A_2 - 3 \log(342.7)$$

$$\therefore A_2 = 3.9966 \times 10^{13}$$

이상과 같이 구해 본 A_1 과 A_2 는 log-log Scale로 볼 때는 매우 근접한 점이 된다

불완전 용입으로 시공된 성수대교 수직부재의 피로거동을 결정하는 상수인 A의 값을 실험에 의해 정해진 A_1 과 A_2 로부터 간단히 4.0×10^{13} 이라 하면 부설용접된 수직부재의 Paris의 지수식은 다음과 같다.

$$N = 4.0 \times 10^{13} \times (Sr)^{-3}$$

여기서 S_r 는 유효등가 응력변동범위로서 트럭의 중량이 일정하지 않고 트럭마다 다르기 때문에 각각의 트럭중량에 따른 응력 변동범위를 대표하는 값으로 Miner의 법칙에 따라 등가응력변동범위(Equivalent Stress Range)를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}(S_r)_{\text{miner}} &= \left\{ \sum \gamma_i S_{ri}^3 \right\}^{\frac{1}{3}} \\ &= \left\{ \sum \gamma_i (\phi_i \alpha \cdot S_{rd})^3 \right\}^{\frac{1}{3}} \\ &= \left\{ \sum \gamma_i \phi_i^3 \right\}^{\frac{1}{3}} \alpha \cdot S_{rd}\end{aligned}$$

여기서 $\phi = \left\{ \sum \gamma_i \phi_i^3 \right\}^{\frac{1}{3}}$ 라고 하면,

$$(S_r)_{\text{miner}} = \alpha \cdot \phi \cdot S_{rd} \text{이다.}$$

성수대교 교통량 조사에 의하면 위 식에서 트럭하중의 설계하중에 대한 중량분포를 나타내는 지수인 $\sum \gamma_i \phi_i^3$ 의 값은 대략 0.157즉 $\phi=0.54$ 인 것으로 (참조 8-5-2)나타났다. 또한 일반적으로 계산응력과 실측응력과의 비율(응답비) α 는 횡부재(Transverse Member)는 0.8, 종부재(Longitudinal Member)는 0.7로 많은 연구와 실측을 통하여 결정된 값이다. 따라서 DL-18 하중에 해당하는 $(S_r)_{\text{miner}}$ 의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}(S_r)_{\text{miner}} &= 0.8 \times (0.54) \times (257.7) \text{kg/cm}^2 \\ &= 111.46 \text{kg/cm}^2\end{aligned}$$

이 값은 앞절의 교통량분석을 통한 등가응력 변동범위와 설계치인 90.9kg/cm^2 보다 약간 높은 값을 보여준다. 그러나, 제4.7절의 재하시험결과에 의하면 응답비 α 의 값은 1차응력에 대해 0.87로서 여기서 사용된 α 의 값에 상당히 근접해 있다.

이 등가응력범위를 이용하면 성수대교 수직부재의 피로수명은

$$\begin{aligned}N &= 4.0 \times 10^{13} \times (111.46)^{-3} \\ &= 28.89 \times 10^6 \text{cycles}\end{aligned}$$

로서 성수대교에 15년동안 피로피해를 주었다고 추정된 트럭통행량 37.27×10^6 대의 약 78%에 해당하는 값으로 실제보다 약 3년간 피로수명이 단축되는 것으로 산정되었다. 이렇게 된 이유는 응력산정이 약간 과장되어 있거나, 응답비(0.8)의 추정이 너무 크거나 또는 트럭중량분포 통계치에서 추정한 $\sum \gamma_i \phi_i^3 = 0.157$ 값에 오차가 있거나 또는 여러 가지 표면적으로 나타나지 않은 이유가 있기 때문이다. 이러한 여러 가지 不確定한 요소들을 생각해 볼 때 서로 다른 방법으로 추정된 이 두 가지 값이 차이가 있지만 그것이 그렇게 크게 틀린 결과라고는 할 수 없다. 만약에 실제로 성수대교를 통과한 하중이 DB-24하중에 해당하는 트럭하중이었다면,

$$\begin{aligned} (S_r)_{\text{miner}} &= (0.8) (0.54) (342.7) \\ &= 148.44 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

이고, 이에 따른 피로수명은,

$$\begin{aligned} N &= 4.0 \times 10^{13} (148.44)^{-3} \\ &= 12.23 \times 10^6 \text{ cycles.} \end{aligned}$$

로서 DB-18 의 경우보다 훨씬 짧았을 것이다.

이 결과를 간단히 도표로 정리하면 다음과 같다.

구 분	DB-18 하중의 경우	DB-24 하중의 경우
등가응력 변동범위	111.5 kg/cm ²	148.4 kg/cm ²
실제트럭 통행량	37.27×10^6 대	37.27×10^6 대
피로실험에 의한 추정피로 수명 (N)	28.89×10^6 사이클	12.23×10^6 사이클
피로실험에 의한 추정피로 년수	약 12년	약 5년

피로시험을 검토할 수 있는 다른 방법은 DB-18 하중을 가하여 실험에 사용한 시편의 균열성장을 선형파괴역학(Linear Fracture Mechanics)의 방법을 이용하여, 이론적으로 피로수명을 구하고 이것을 실험치와 비교하는 것이다. 수직부재의 피로수명은 ① 수직재 플랜지의 불안정한 용입으로 인하여 용입되지않은 부분을 내재균열(Embedded Crack)로 간주하면 이 중앙관통균열(Center-through Crack)이 성장하여 플랜지가 완전히 끊어지고 그 후는, ② 복부판으로 성장한 균열(Edge Crack)이 완전파괴로 간주될 때까지 성장하는 과정의 2단계로 구성되었다고 볼 수 있다.

플랜지의 용입부족으로 인한 Built-in Crack의 모양을 플랜지 중앙관통균열이라고 간주하여 초기균열의 크기(a_i)가 0.5cm이고 최종균열의 크기를 0.9cm라고 하면 플랜지가 파단될 때까지의 수명은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N_f = \int_{a_i=0.005m}^{a_f=0.009m} \frac{1}{C} (\Delta K)^{-3} da$$

여기서 $C=6.893 \times 10^{-12} m^{1\frac{1}{2}}/MN^3$ 이고 ΔK 는 다음과 같다.

$$\Delta K = f\left(\frac{a}{b}\right) \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$$

$$\text{여기서, } f\left(\frac{a}{b}\right) = \left\{ 1 - 0.025\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0.06\left(\frac{a}{b}\right)^4 \right\} \cdot \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2b}}$$

이며 a/b 의 어느 값에 대해서도 0.1% 보다 적은 오차밖에 없는 Data의 보정식이다. $\Delta \sigma$ 는 공칭응력 범위로 257.7kg/cm² 또는 25.3MPa이다. 이러한 플랜지의 피로수명을 계산하기 위하여 Gaussian Quadrature를 이용하여 적분을 하면 한쪽 플랜지가 완전히 끊어지기까지 즉 $N_f = 2.975 \times 10^6$ 사이클이 필요한 것으로 나타난다.

두 번째 피로균열성장단계에서는 한쪽 플랜지가 완전히 파단되고 플랜지의 균열이 복부판으로 진행하면 제 8.3절에서 보인 것처럼 수재부재가 완전히 못쓰게 되었다고 가정할 수 있는 최종균열은

$$K = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi a} \leq Kc = 178.3 \text{MPa}\sqrt{m}$$

에서 $a_f = 9.2\text{cm}$ 를 구할 수 있다. 따라서 복부판에서의 피로수명은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N_w = \int_{a_i=0.018m}^{a_f=0.092m} \frac{1}{C} (\Delta K)^{-3} da$$

여기서 $\Delta K = f\left(\frac{a}{b}\right) \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a}$

$$f\left(\frac{a}{b}\right) = 1.12 - 0.231\left(\frac{a}{b}\right) + 10.55\left(\frac{a}{b}\right)^2 - 21.72\left(\frac{a}{b}\right)^3 + 30.39\left(\frac{a}{b}\right)^4$$

이 때 Flange의 단면적이 큰 것을 감안한다면 Web의 하중분담률이 적기 때문에 일반적인 Edge Crack의 경우와는 달리 $\Delta \sigma$ 의 값으로 Web 면적에 의한 Stress를 이용하여야 한다. 양쪽 Flange가 끊어졌을 때의 Web의 응력변동범위는 $\Delta \sigma = 655\text{kg/cm}^2 = 65.1\text{MPa}$ 로서 Gaussian Quadrature를 이용하여 적분하면 복부판의 균열이 최종 균열 크기가 될 때까지의 피로수명은 $N_w = 482840 \text{ cycle}$ 이 된다.

따라서 성수대교 수직부재의 용접된 조건과 같이 제작하여 DB-18 하중을 작용한 시편의 피로수명은 플랜지의 중앙관통균열이 성장하여 플랜지가 완전히 파단되고 균열이 마침내 복부(Web)에서 성장하여 최종상태가 될 때까지의 2단계로 추정 한 수명의 숨이되므로, 시험편의 수명은,

$$\begin{aligned}
 N_T &= N_f + N_w \\
 &= 2.975 \times 10^6 + 0.483 \times 10^6 \\
 &= 3.458 \times 10^6 \text{ cycles이다.}
 \end{aligned}$$

이 값은 실제 시험의 응력작용횟수인 2.56×10^6 사이클보다 0.898×10^6 사이클만큼 크다. 이러한 차이는 실제시험에서는 플랜지가 완전히 두 부분으로 갈라지지 않는 상태에서 균열이 복부판으로 전파되어 최종 균열 크기로 성장하였지만 이론적으로 단순화 시킬 때는 이러한 상태를 고려하기가 어렵기 때문이다.

결론을 말하면 위에서 가정한 균열성장 패턴이 크게 틀리지 않았으며 이론적으로 추정된 피로수명이 시험에서 구한 수명과 근사적으로 일치하였다. 또한 이론적으로 추정된 수직부재 수명도 성수대교를 실제로 통과한 트럭통행량과 비교하여 볼 때 크게 틀리지 않았다. 이러한 점으로 볼 때 용입불량으로 인한 용접부실이 강재피로에 대한 저항능력을 격감시켰고 성수대교 수직부재가 15년밖에 견디지 못한 주요 원인 중의 하나임이 분명하다.

4-5-5-2 Bracket 및 가로보 지지구조물의 수직재에 미치는 영향을 고려한 피로수명 계산

동측 수직재의 상단에 Bracket 구조물은 1991년 10월에, 동측 및 중앙의 가로보 지지구조물은 1993년 4월에 설치되었다. Bracket 및 가로보 지지구조물의 피로 수명에 미치는 영향을 분석하기 위해 성수대교 개통 이후 1991년 10월까지를 step 1, 1993년 4월까지를 step 2, 1993년 4월 이후를 step 3으로 하여 각 단계별로 등가응력 및 그에 대응하는 반복횟수를 계산하고, Miner's Rule을 적용하여 1993년 4월을 시점으로 하는 잔여 피로 수명을 계산하여 구했다. 잔여 피로 수명에 개통이후

1993년 4월까지의 기간 13.5년을 더하면 수직재의 피로 수명이 된다. 이미 파괴가 일어난 것으로 계산된 경우는 잔여 피로 수명이 없으므로 직접 피로 수명으로 표현하였다. 교통량은 교통량 조사자료를 근거로 계산한 일방향 일일 평균 트럭통행량 3406대를 기준으로 하고, 적용 구조상세 범주는 서울지방검찰청의 성수대교 붕괴사고 원인 조사보고서 (그림 4-11)의 성수대교 수직재의 피로시험에 의한 S-N 곡선도를 적용하여 계산하였다.

등가응력을 구하기 위한 해석시에 Bracket 구조물은 핀 연결 수직재의 회전운동을 구속하는 역할을 하므로 Bracket 구조물이 있는 수직재는 끝단을 고정단으로 하여 응력을 계산하였고 특히, 가로보 지지구조물이 수직재에 미치는 영향을 평가함에 있어서는 H형강 기둥에 의해서 지지된 가로보의 반력이 수직재로 직접 전달되는 경우를 고려하여 응력을 구하였다.

DL-18 하중의 경우, 원 설계 시스템의 수직재의 피로 수명은 23.3년으로 가로보 지지구조물이 설치된 중앙 수직재는 22.3년, Bracket 및 가로보 지지구조물이 설치된 동측 수직재는 18년으로 피로 수명이 감소한다.

DL-24 하중의 경우, 원 설계 시스템의 수직재의 피로 수명은 9.9년으로 Bracket 및 가로보 지지구조물이 설치되기 이전에 이미 피로 수명이 다한 것으로 계산되어 동측 수직재 및 중앙 수직재의 피로 수명은 원 설계 시스템의 수직재의 피로 수명 9.9년과 같다.

1) 설계단면 (DL-18 하중, 시험 S-N곡선 적용) --- 동측 수직재

$$\text{step 1 : } S_{eq1} = 111.4 \text{ kg/cm}^2 \quad (1991.10\text{월까지})$$

$$N_1 = 29,010,000, \quad n_1 = 15,447,485$$

$$\text{step 2 : } S_{eq2} = 131.8 \text{ kg/cm}^2 \quad (1991.10\text{월에서 } 1993.4\text{월까지})$$

$$N_2 = 17,470,000, \quad n_2 = 1,519,660$$

$$\text{step 3 : } S_{eq3} = 140.2 \text{ kg/cm}^2 \quad (1993.4\text{월 이후})$$

$$N_3 = 14,510,000, \quad n_3 = ?$$

여기서,

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1$$

$$\therefore n_3 = 5,521,000$$

$$\frac{5.521 \times 10^6}{3406 \times 365} = 4.5\text{년} \quad (\text{잔여 피로 수명} = 4.5\text{년})$$

2) 설계단면 (DL-24 하중, 시험 S-N곡선 적용) — 동측 수직재

$$\text{step 1 : } S_{eq1} = 148.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_1 = 12,340,000, \quad n_1 = 15,447,485$$

$$\frac{1.234 \times 10^7}{3406 \times 365} = 9.9\text{년} \quad (\text{피로 수명} = 9.9\text{년})$$

3) 설계단면 (DL-18 하중, 시험 S-N곡선 적용)..... 중앙 수직재

$$\text{step 1 : } S_{eq1} = 111.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_1 = 29,010,000, \quad n_1 = 15,447,485$$

$$\text{step 2 : } S_{eq2} = 111.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_2 = 29,010,000, \quad n_2 = 1,519,660$$

$$\text{step 3 : } S_{eq3} = 115.1 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_3 = 26,230,000, \quad n_3 = ?$$

여기서,

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} = 1$$

$$\therefore n_3 = 10,890,000$$

$$\frac{1.089 \times 10^7}{3406 \times 365} = 8.8 \text{년 (잔여 피로 수명 = 8.8년)}$$

4) 설계단면 (DL-24 하중, 시험 S-N곡선 적용)……중양 수직재

$$\text{step 1 : } S_{eq1} = 148.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_1 = 12,340,000, \quad n_1 = 15,447,485$$

$$\frac{1.234 \times 10^7}{3406 \times 365} = 9.9 \text{년 (피로 수명 = 9.9년)}$$

5) Bracket 및 가로보 지지구조물이 없는 원 설계 시스템의 피로수명

$$\text{DL-18 하중 : } S_{eq1} = 111.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_1 = 29,010,000,$$

$$\frac{2.901 \times 10^7}{3406 \times 365} = 23.3 \text{년 (피로 수명 = 23.3년)}$$

$$\text{DL-24 하중 : } S_{eq1} = 148.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$N_1 = 12,340,000,$$

$$\frac{1.234 \times 10^7}{3406 \times 365} = 9.9 \text{년 (피로 수명 = 9.9년)}$$

(표 4-5-5-2) Bracket 및 가로보 지지구조물의 영향을 고려한 수직재 상단의 용접 이음부에서 피로 수명

구 분	중앙 수직재의 피로 수명(실험곡선)	동측 수직재의 피로 수명(실험곡선)	비 고
설 계 단 면 (DL-18 하중)	22.3년 (23.3년)	18.0년 (23.3년)	()괄호는 Bracket 및 가로보 지지구조물이 없는 원설계 시스템의 피로수명
설 계 단 면 (DL-24 하중)	9.9년 (9.9년)	9.9년 (9.9년)	

※ 잔여 피로 수명+13.5년=피로 수명

4-6 기타시험

4-6-1 파단면 관찰(Fracture Surface Examination)

파단면 육안검사의 목적은 균열이 시작된 위치를 확인하며 급속한 파단(Fast Fracture)이 일어난 불안정한 균열의 모양과 크기를 육안으로 확인하기 위한 것이다. 일반적으로 균열의 시작은 하나 또는 하나이상의 核에서 시작하여 피로 균열로 성장하던가 응력이나 균열의 크기가 일정조합을 넘게 되면 갈매기 무늬(Chevron Marking)를 남기면서 급속히 균열이 커지면서 파단이 된다. 이때 재료의 성질인 파단인성 및 항복강도에 따라 강판의 변형량 및 파단면 경사각도와 모양이 달라지게 되므로 파단면의 육안검사는 재료의 물성치를 정성적(Qualitatively)으로 판단할 수 있는 매우 중요한 검사이다.

파단면 육안검사는 사고 발생직후 조직적으로 수행되어야하나 이 검사의 중요성에 대한 인식부족 및 사건의 사회적 심각성등으로 인하여 제대로 행하여 질 수 없었고 94년 11월 2일 감정단을 위한 현장조사때 부분적으로 이루어졌기 때문에 그때 조사한 것과 입수 가능한 사진에 의존하는 수밖에 없

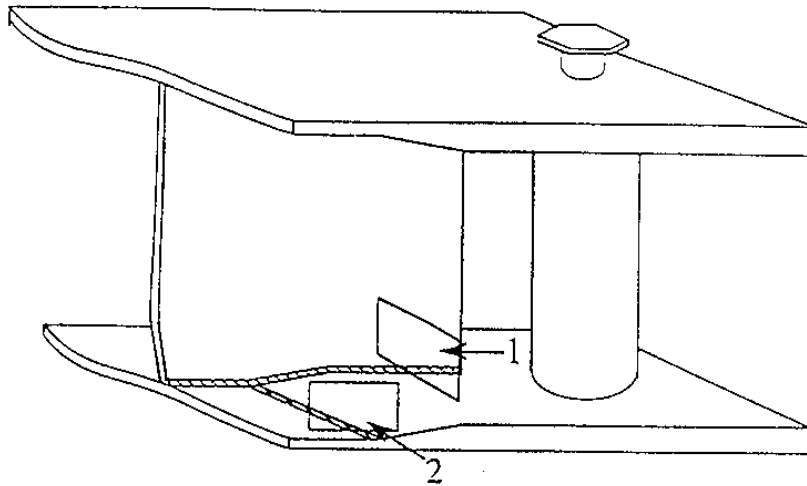
다. 94년 11월 2일 현장조사때는 신문 방송국기자 및 관계공무원, 교수 감정원등이 검사 당일 몰려있고 장비가 불충분하여 안정된 상태에서 파단면 검사는 불가능하였다.

플랜지의 용접상태는 대부분 매우 불량하여 용융되지 않은 부위(두께 18mm중 8~10mm)는 다듬어지지 않은 상태로 용접을 위하여 flame이 플랜지 전 길이에 걸쳐 뚜렷하며 검붉게 산화되어 있었고 가장자리 얇은 용접부위(18mm 두께의 양쪽으로 4mm씩)는 사고 당시 급속한 파단으로 끊어졌기 때문에 산화되기 전이라 가는 두줄의 은색으로 선명하였다.

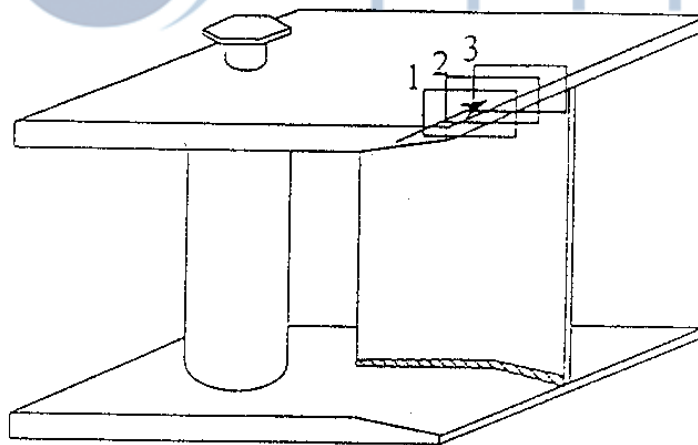
4-6-2 파단면 조직 검사(Macroscopic Fracture Surface Examination)

파단면 조직검사의 하나로 매크로 조직관찰은 금속시편을 여러번 연마하여 점점 더 고운 샌드페이퍼로 갈아내서 광택을 낸후 금속조직의 결정체가 잘 보이도록 에칭용액(알코올과 5% 질산 혼합물, Nital)으로 처리를 하면 열처리 정도에 따라 에칭의 방향과 깊이가 달라지므로 육안으로도 쉽게 그 차이를 분별할 수 있게 된다.

Macro 조직관찰은 파단면의 용입깊이를 확인하고 아울러 파단되지 아니한 맞대기 용접이음 및 필렛용접부의 용접상태를 확인하기 위하여 (그림 4-18 및 4-19)에 표시한 위치에서 시편을 각각 채취하였으며, KS D0210(강의 매크로 조직시험 방법)에 따라 Polishing 및 Etching 한 후 관찰을 하였다.



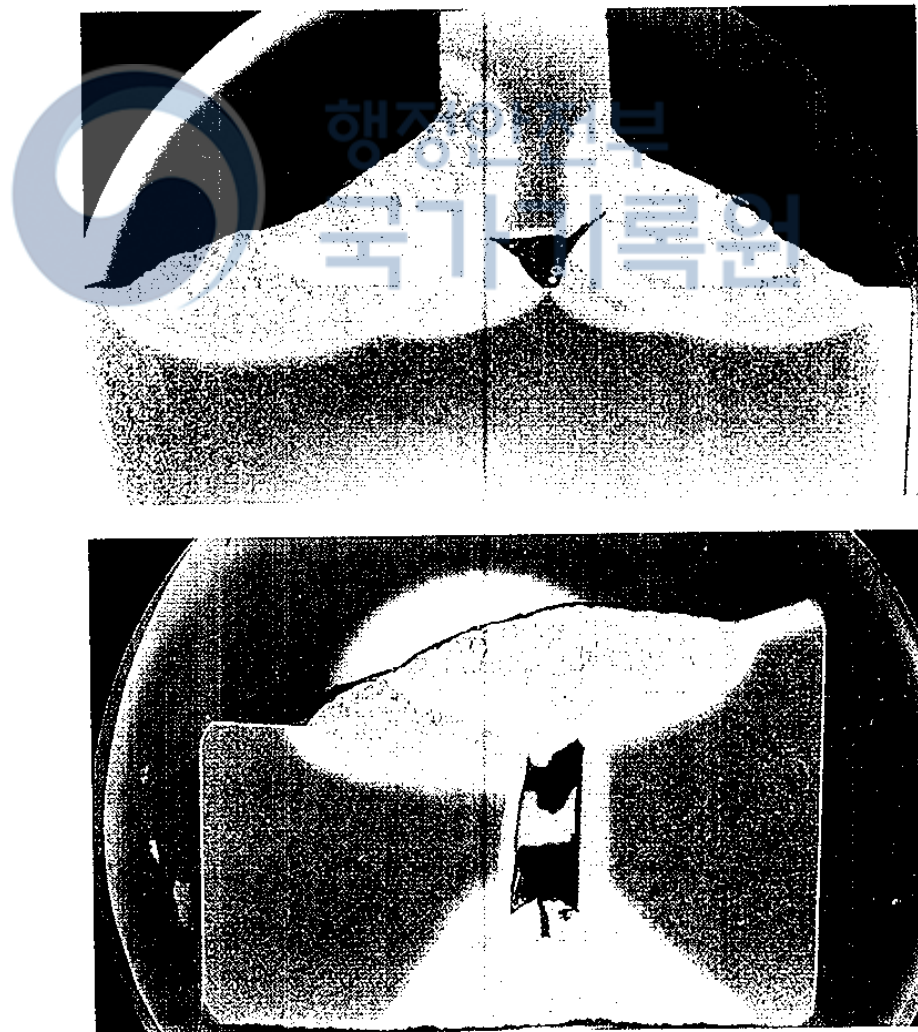
(그림 4.18) 강북-서쪽 수직재의 Macro 조직 시험편 채취위치



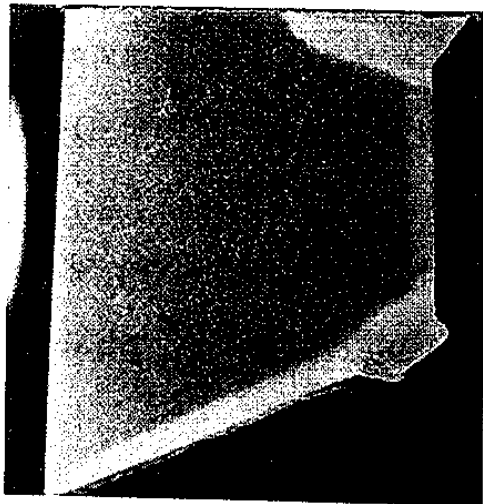
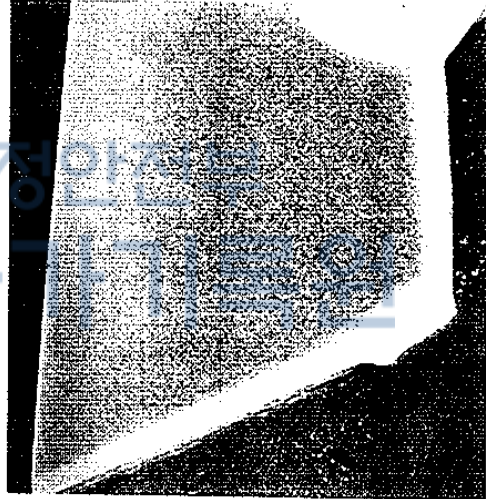
(그림 4.19) 강북-동쪽 수직재의 Macro 조직 시험편 채취위치

Macro 시험결과는 각각 <사진 4-20 및 4-21>과 같다. <사진 4-20>에서 보듯이 필렛용접의 경우에는 용입 깊이는 별 문제가 없는 것으로 사료되나 용접을 하기전 모재의 다듬기가 정밀하지 않기때문에 모재와 모재사이의 간격이 일정하지 않고 불규칙하다. <사진 4-20>의 첫번째 상세의 필렛용접의 오른쪽

비드 아래는 Underbead Cracking이 발생되어 있는 것을 보여준다. 두번째 맞댐용접의 하부 용접부 첫번째 비드에도 Underbead Cracking이 완연하게 나타나 있다. 수직재 맞대기 용접이음에서는 용입불량이 뚜렷이 나타나고 있다. 특히 파단면에 대한 Macro조직인 <사진 4-21>의 경우 가스 절단에 의한 입열과 용접에 의한 입열이 거의 평행되게 나타나 있는 실정으로 파단된 수직재의 경우 용입깊이 및 용접입열량이 특히 작았던 사실을 추정할 수 있다.



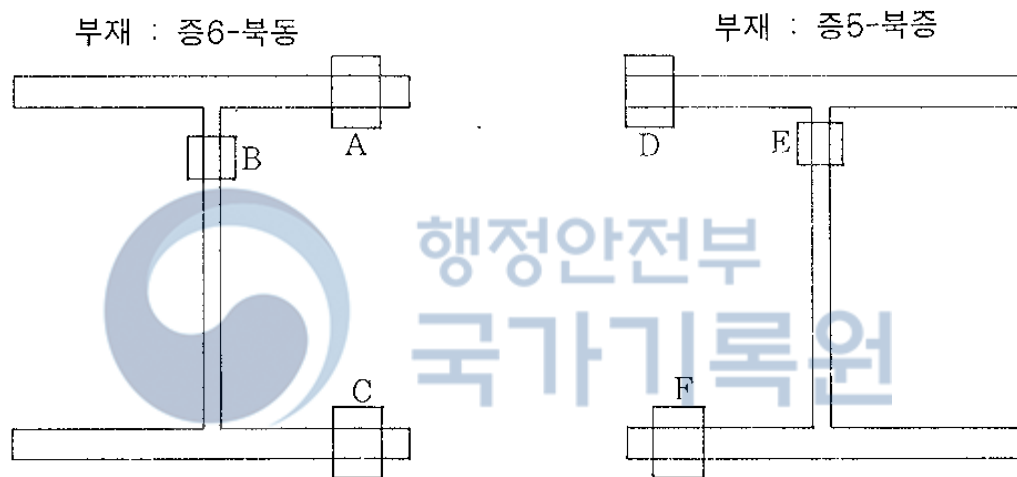
<사진 4-20> 강북-서쪽 수직재의 Macro 조직



〈사진 4-21〉 강북-동쪽 수직재 파단면에 대한 Macro 조직

4-6-3 전자현미경 파면 조직검사(Electron Microscope Fractographic Examination)

파단면의 조직을 전자현미경으로 관찰하여 파단의 종류를 확인하기 위하여 파단면에 대하여 SEM(Scanning Electron Microscope) 촬영을 실시하였다. 시험편 채취위치는 (그림 4-22)과 같으며, 파단면의 산화물을 제거하기 위하여 HCl 용액에 2~3초간 침지한 후 꺼내어 알콜로 세척하는 방법을 파면관찰이 가능할 때 까지 수차례 반복하였다.



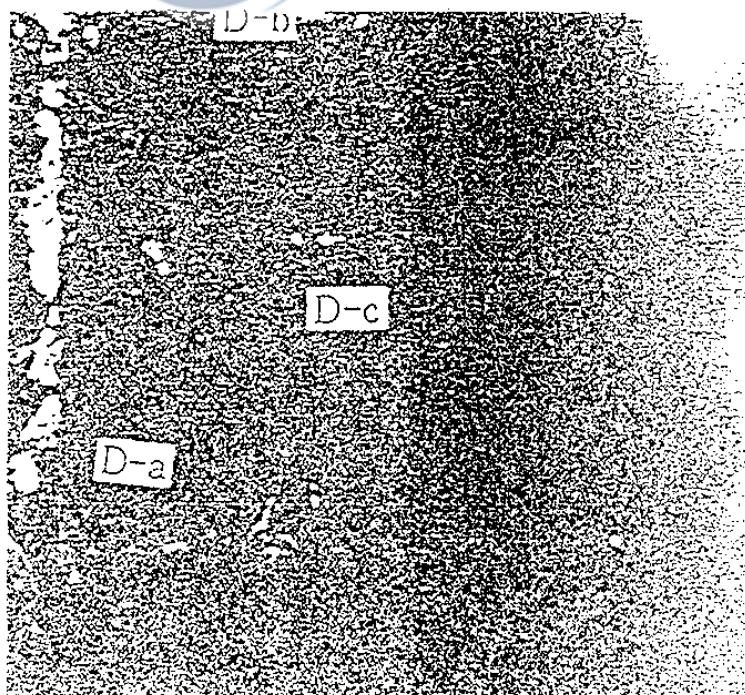
(그림 4-22) SEM 시편 채취위치

강북-동쪽 수직재 파단면의 경우에는 부식이 너무 진행되어 SEM 촬영이 어려웠으며, 강북-중앙부 수직재 파단면의 경우에는 위치 D·E·F별로 각각 7회, 1회 및 3회의 세척을 실시하였다.

북동측 부재의 SEM 촬영위치는 각각 <사진 4-23, 4-24 및 4-25>와 같으며, <사진 4-26, 4-27 및 4-28>에 각 촬영위치에 따른 SEM 사진을 나타내었다.

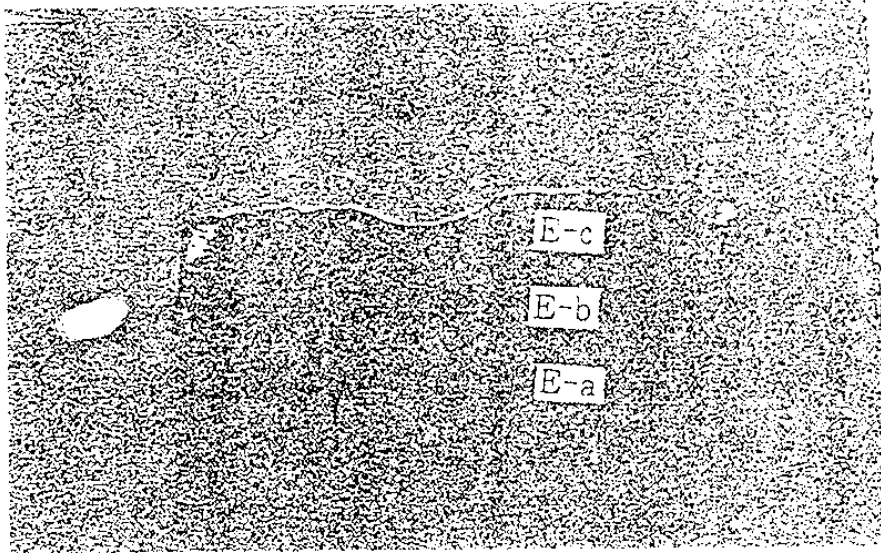
SEM 사진을 관찰한 결과 Flange 부분의 파단면에서는 연성파괴를 나타내는 Microvoid Coalescence로 인한 Ripple의 형상이 뚜렷이 나타나고 있

으며, 특히 D-c부분의 경우 3000배로 확대하여 촬영한 결과 피로에 의한 파괴시 흔히 나타나는 줄무늬 (Striation)로 볼 수 있는 선이 나타났으며, 따라서 피로에 의한 연성파괴가 발생한 것으로 사료된다. 반면 Web부분의 파단면 SEM 촬영 E위치에서는 연성이 높은 강재가 급속히 파단이 될때 생기는 것과 같이 전단력을 받아 조직이 늘어난 Microvoid Coalescence 양상이 확연하게 드러났다. 이는 광범위한 용입불량에 의한 용접결함이 균열의 시작점으로 작용하여 반복하중에 의한 피로균열이 발생하였으며, 이러한 피로파괴가 Web쪽에 진전되어 최종적으로 파괴가 발생한 것으로 사료된다. 다만, Web의 한 쪽에서만 시편을 채취하여 SEM 촬영한 결과 Flange의 피로균열이 Web에 진전된 부분이 확인되지 아니하였다.



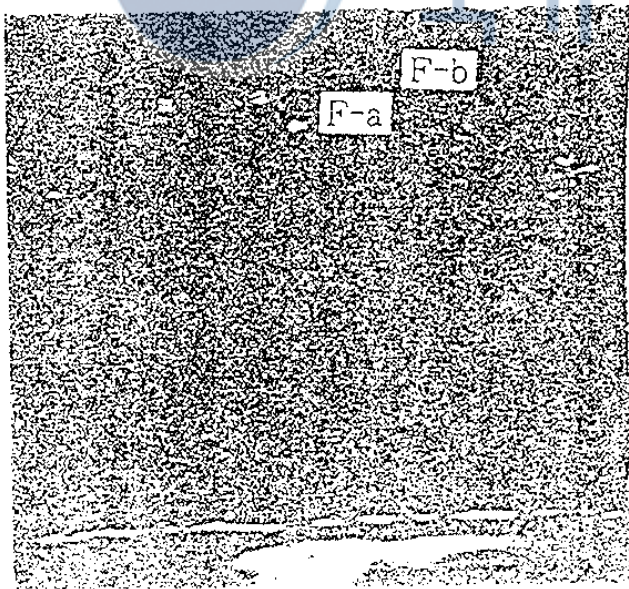
시편 D

〈사진 4-23〉 시험편 채취위치 D에서의 SEM 촬영위치



시편 E

〈사진 4-24〉 시험편 채취위치 E에서의 SEM 촬영위치

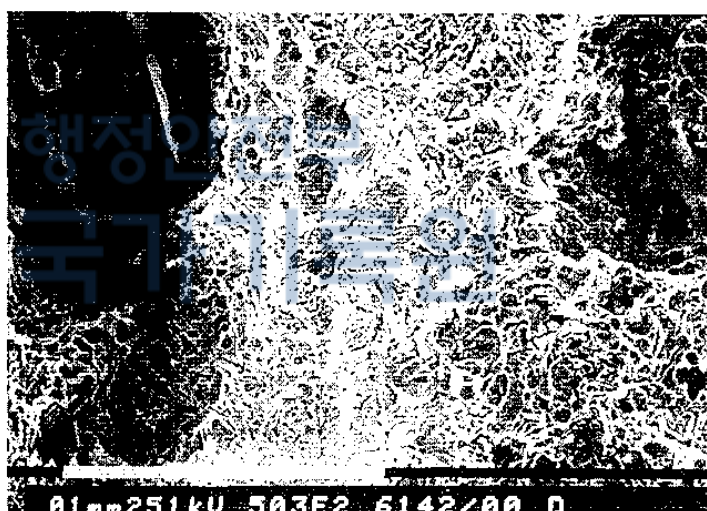


(시편 F)

〈사진 4-25〉 시험편 채취위치 F에서의 SEM 촬영위치



D-a x500

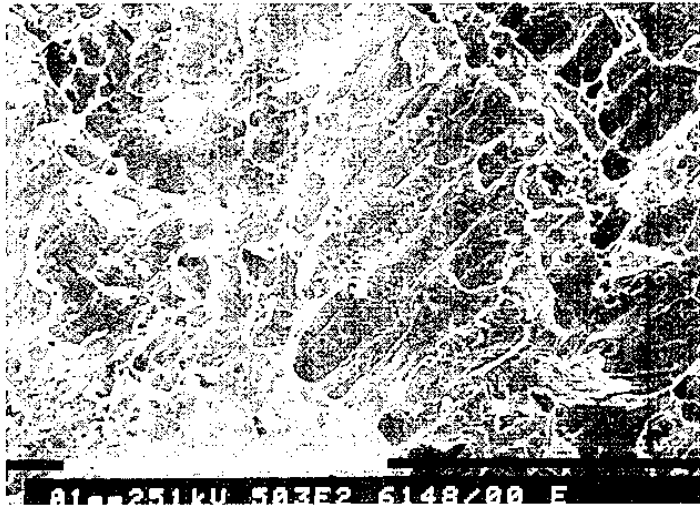


D-b x500

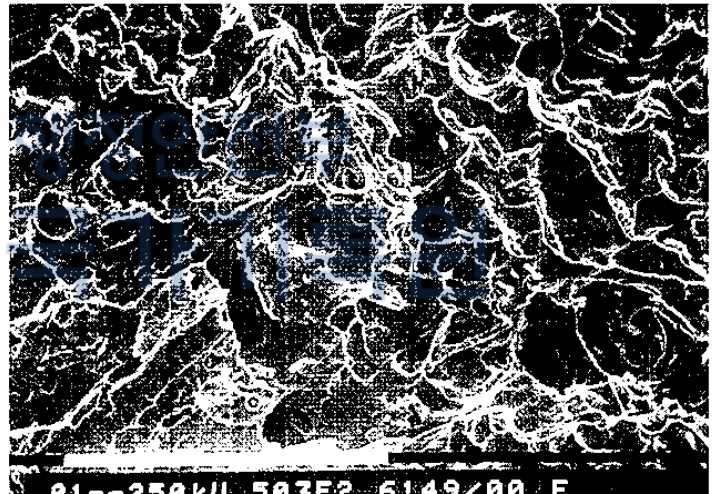


D-c x3000

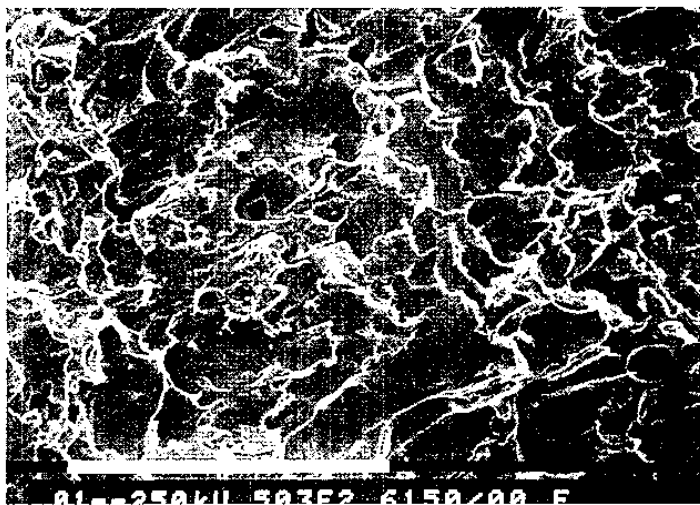
〈사진 4-26〉 시험편 채취위치 D에서의 SEM 사진



E-a x500

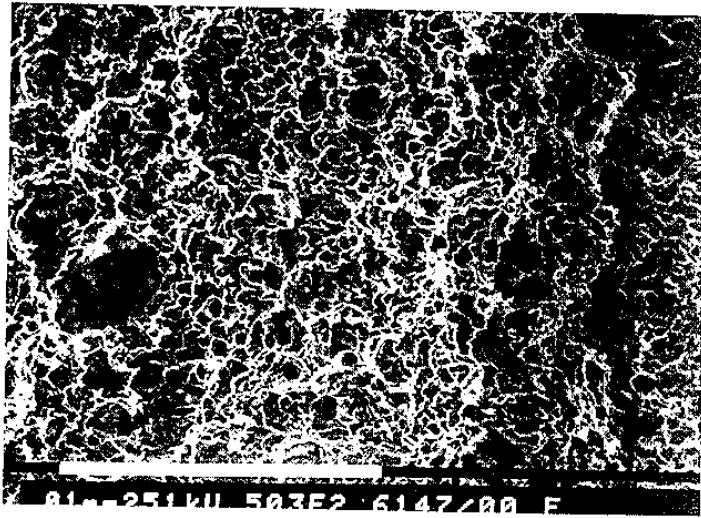


E-b x500

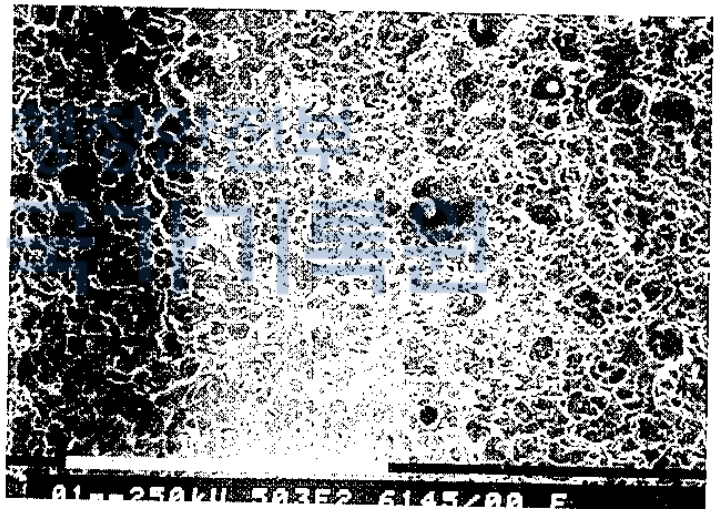


E-c x500

〈사진 4-27〉 시험편 채취위치 E에서의 SEM 사진



F-a x500



F-b x500



F-b x3000

〈사진 4-28〉 시험편 채취위치 F에서의 SEM 사진

4-7 재하시험

4-7-1 목 적

재하시험의 목적은 교량의 실응답 특성을 분석하고, 잔존내하력 및 안전도를 평가하여 붕괴원인 분석에 필요한 기본자료를 제공하는데 있다.

4-7-2 시험내용의 총괄

(1) 시험일정

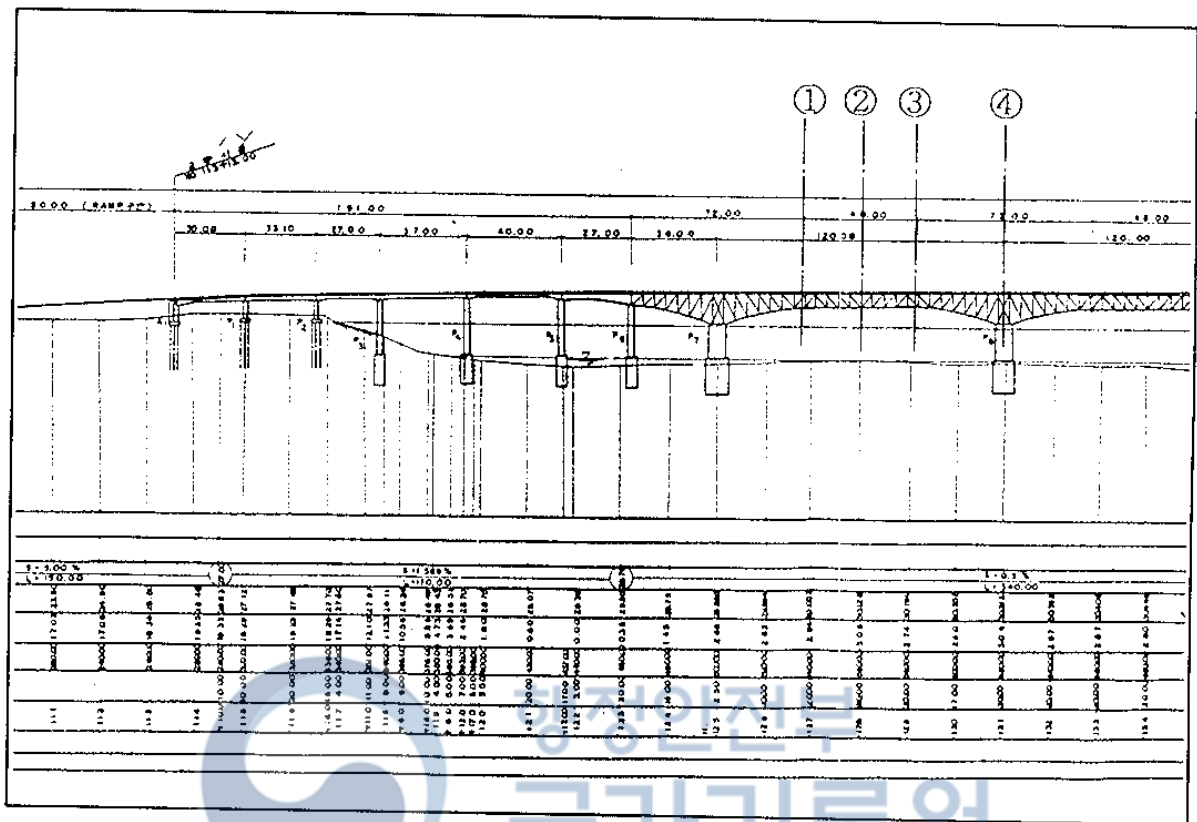
재하시험은 3차에 걸쳐 수행되었으며 세부일정은 (표 4-16)과 같다.

(표 4-16) 시험일정

재 하 시 험	일 정	시 험 내 용
1 차	94. 12. 12 ~ 2. 15	• 정적재하시험 • 동적재하시험
2 차	95. 1. 7 ~ 1. 19	• 정적재하시험
3 차	95. 3. 14 ~ 3. 16	• 정적재하시험 • 동적재하시험

(2) 시험경간 및 측정단면

시험은 7번교각(P7)과 8번교각(P8) 사이의 경간을 대상으로 하였다. 측정단면은 시험경간 내에서 걸린들보(Suspended Truss)의 시점부, 중앙부, 종점부 및 지점부 4단면으로 하였다. (그림 4-29)와 (표 4-17)에는 시험경간 및 측정단면을 나타내었다.



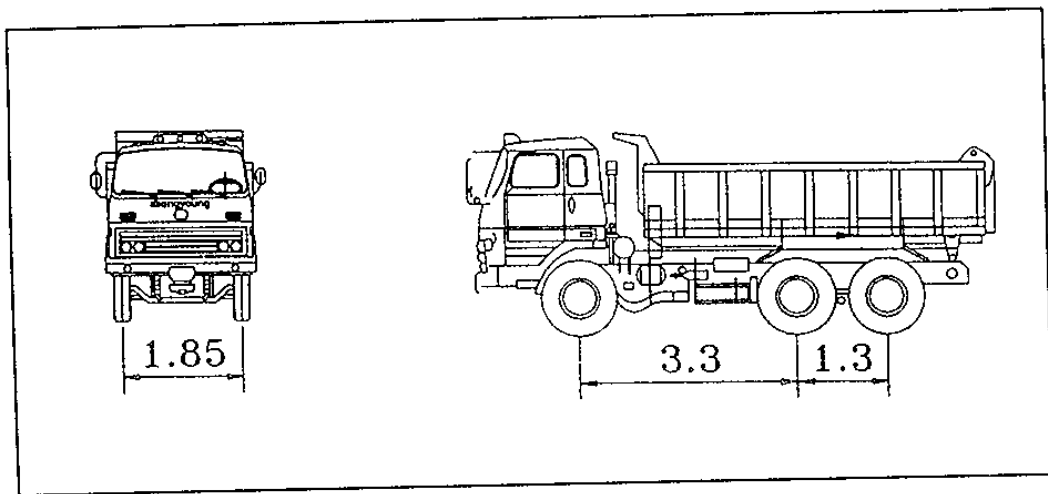
(그림 4-29) 시험경간 및 측정단면

(표 4-17) 측정단면

기	호	위	치
①		결린들보	단부(시점)
②		결린들보	중앙부
③		결린들보	단부(종점)
④		내부지점부	

(3) 재하차량

시험에 사용된 재하차량은 적재중량 15ton의 만재된 덤프트럭이다. 재하차량의 재원은 (그림 4-30)에 나타내었으며 1, 2, 3차 재하시험 각각에 사용된 재하차량의 중량은 (표 4-18)과 같다.



(그림 4-30) 재하차량의 제원

(표 4-18) 재하차량의 중량

재하시험	트럭종류	축 중 량(ton)			총중량 (ton)	적재중량 (ton)	용 도
		전 른	중 른	후 른			
1차	A	7.070	15.165	15.165	37.400	15.00	정·동적용
	B	6.970	14.350	14.350	35.670	15.00	정 적 용
2차	C	6.970	14.350	14.350	35.670	15.00	정 적 용
3차	D	7.000	14.700	14.700	36.400	15.00	정·동적용

(4) 시험내용 및 분석항목

재하시험은 정적재하시험과 동적재하시험으로 나누어 수행되었으며 재하차량에 의한 변형률, 처짐, 가속도 등을 측정하였다. 시험의 세부적 내용 및 분석항목을 (표 4-20)에 총괄적으로 정리하였다.

(표 4-20) 시험내용 및 분석항목 총괄

시험종류		측정항목	위 치	Load Case 횟 수	분석대상	분 석 항 목
정적 재하 시험	1차	변형율 처 짐	단면 ④ 단면 ② 신축이음	14회	대상부재 전 체	• 트러스 각 부재 응력 • 활하중 처짐 • 신축이음변위
	2차	변형율	단면 ②, ③	12회		
	3차	변형율	단면 ①	13회	편 연 결 수 직 재	• 용접부 응력분포 형상 • 횡방향 하중분배 • 횡방향 영향선
동적 재하 시험	1차	처 짐 가속도	단면 ② 단면 ①, ②	20회	대상부재 전 체	• 처짐-시간곡선 • 진동특성
	2차	변형율	단면 ①	7회	편 연 결 수 직 재	• 종방향 영향선 • 충격계수 • 고유진동수

4-7-3 정적재하시험

(1) 시험내용

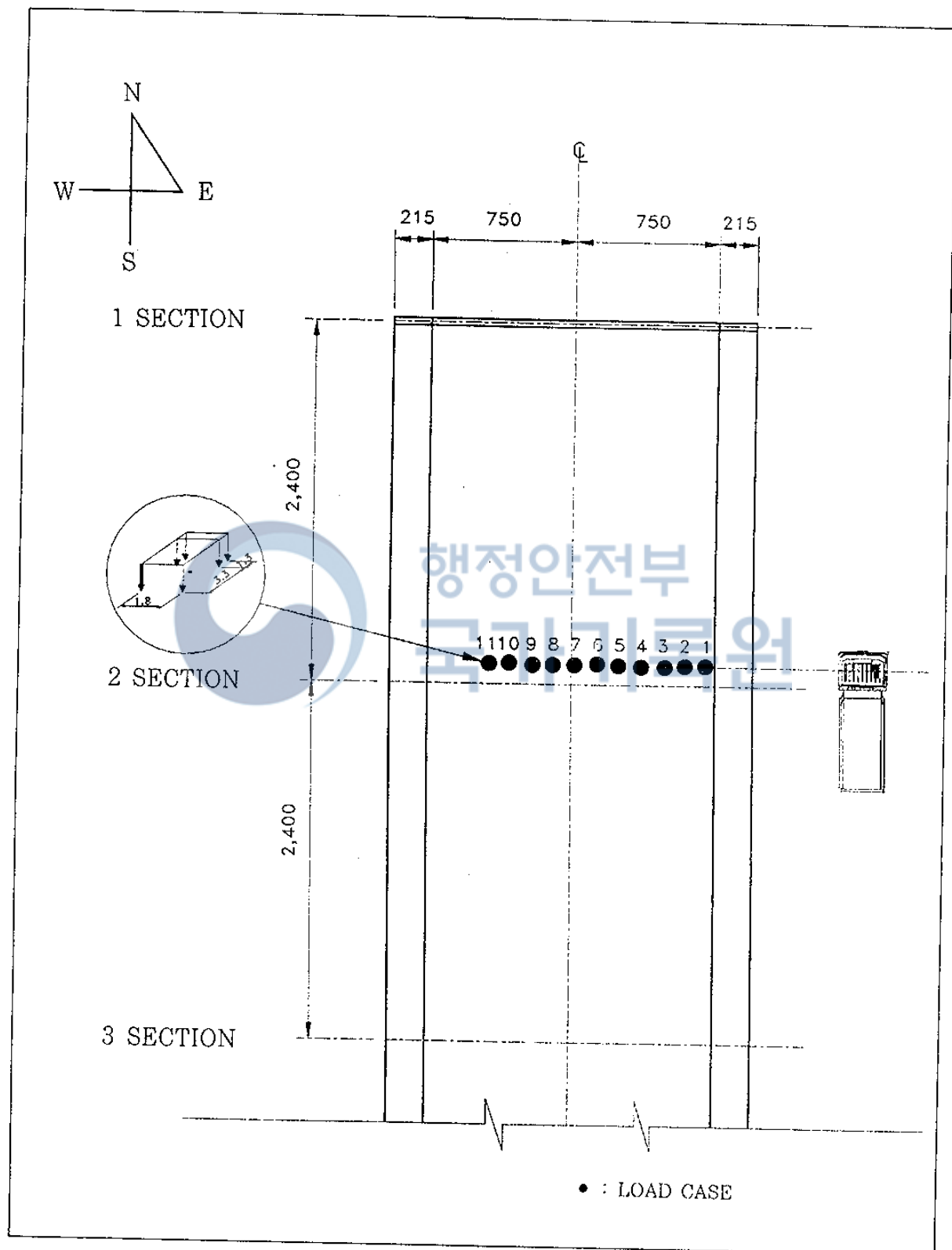
정적재하시험은 트러스 각 부재의 응력, 처짐 및 수직재 용접부의 응력 분포형상 및 횡방향 하중분배 그리고 횡방향 영향선 등을 분석하기 위하여 실시하였다. 측정은 1, 2, 3차에 나누어 실시되었으며 시험의 세부내용 및 분석항목 등에 대해서는 (표 4-19)에 수록하였다. (그림 4-31~4-34)에는 1, 2, 3차 측정시의 Load Case를 나타내었다.

(표 4-19) 시험내용 및 분석항목

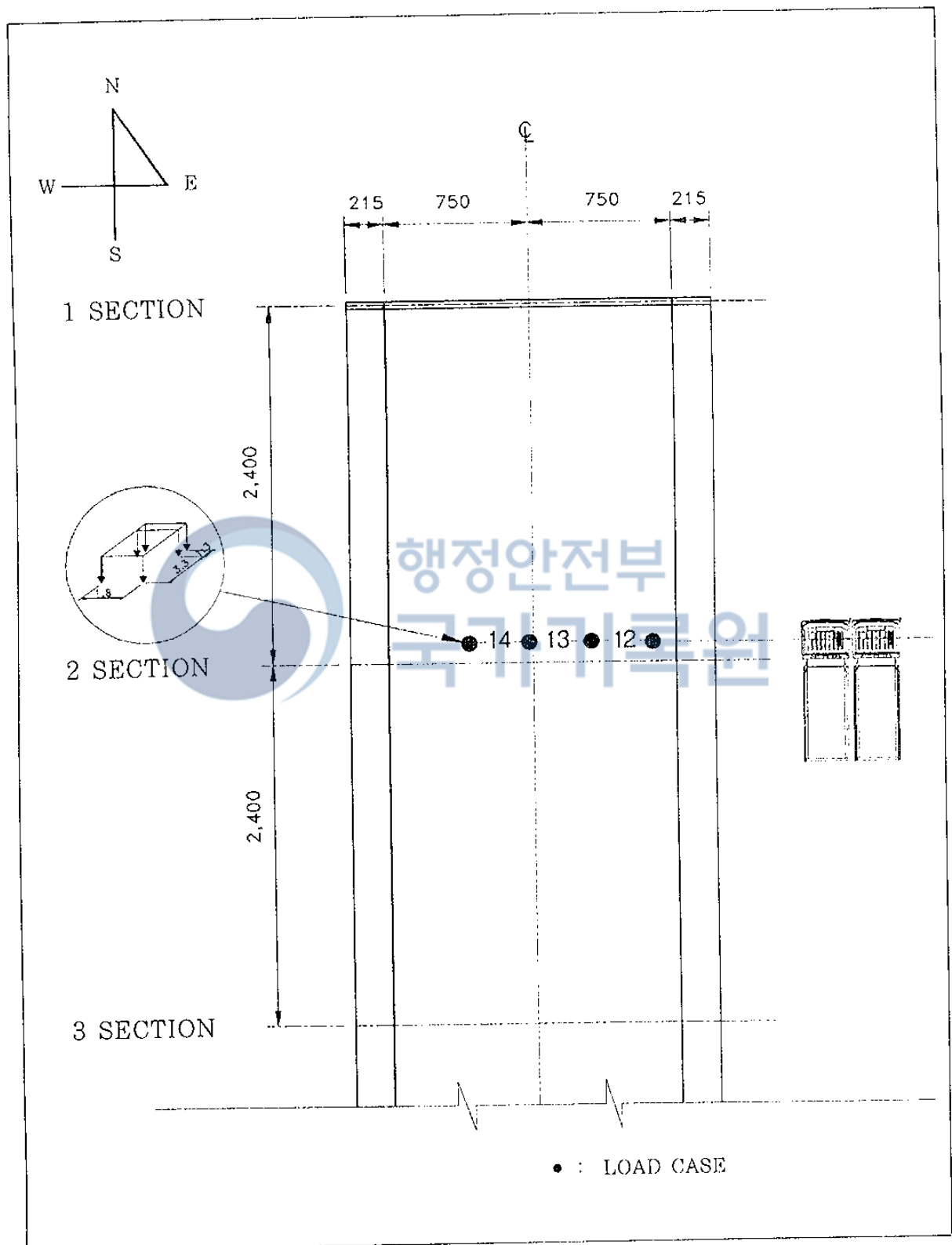
구분	Load Case	트럭종류*	측정항목	측정단면**	분 석 항 목
1 차 측 정	1- 1 ~ 1-11	A	변 형 을 처 짐	단면④	• 트러스 각부재 응력
	1-12 ~ 1-13	A, B 2차선동시제하	변 형 을 처 짐	단면② 신축이음	• 활하중 수직처짐 • 신축이음변위
2 차 측 정	2- 1 ~ 2- 4	C	변 형 을	단면②	• 트러스 각부재 응력
	2- 5 ~ 2- 8	C	변 형 을	단면③	• 트러스 각부재 응력 • 수직재 용접부 응력분포
	2- 9 ~ 2-12	C	변 형 을	단면②,③	• 트러스 각부재 응력
3 차 측 정	3- 1 ~ 3-13	D	변 형 을	단면①	• 수직재 용접부 응력분포 • 횡방향 하중분배 • 횡방향 영향선

※ 표 4-30 참조

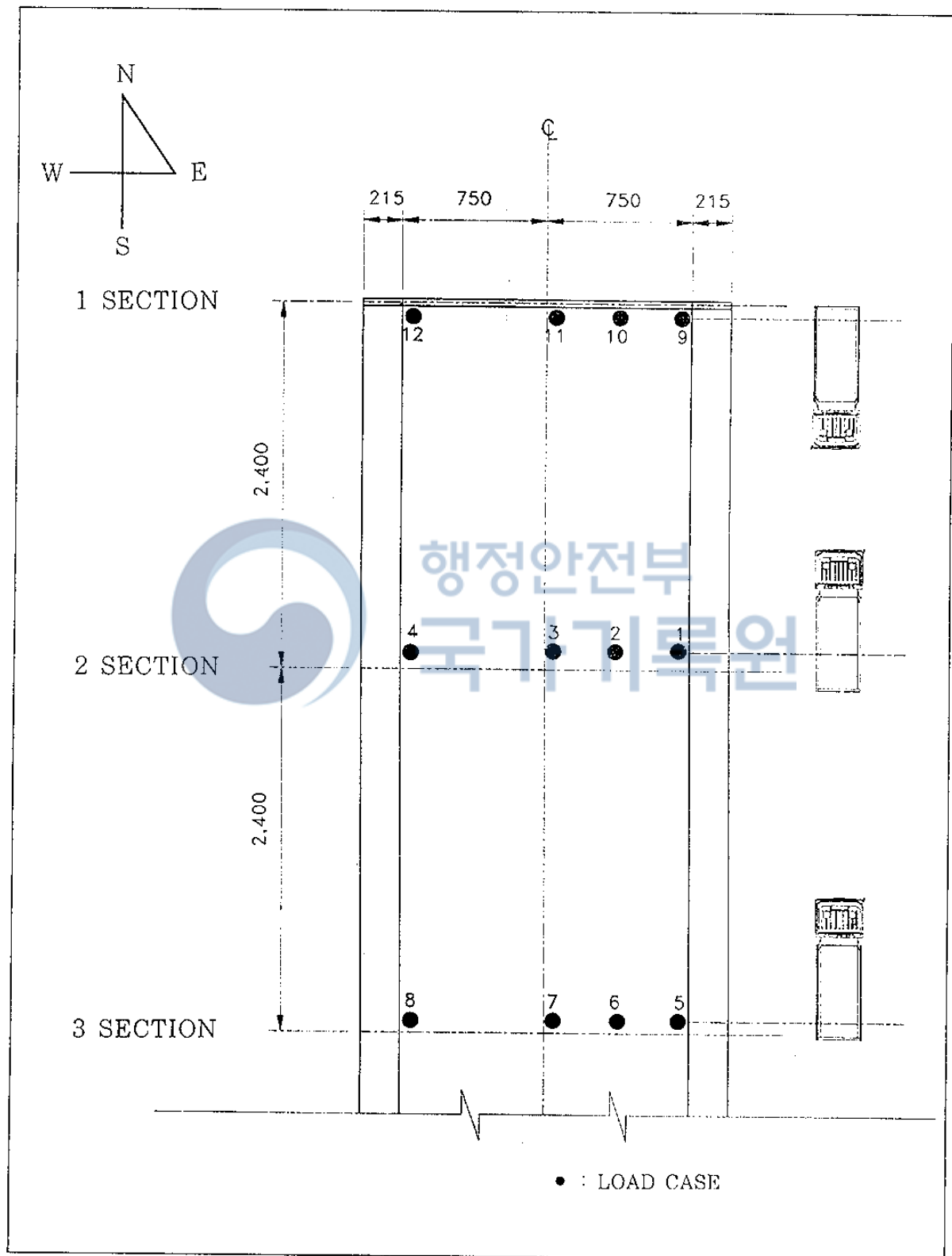
※ 표 4-31 참조



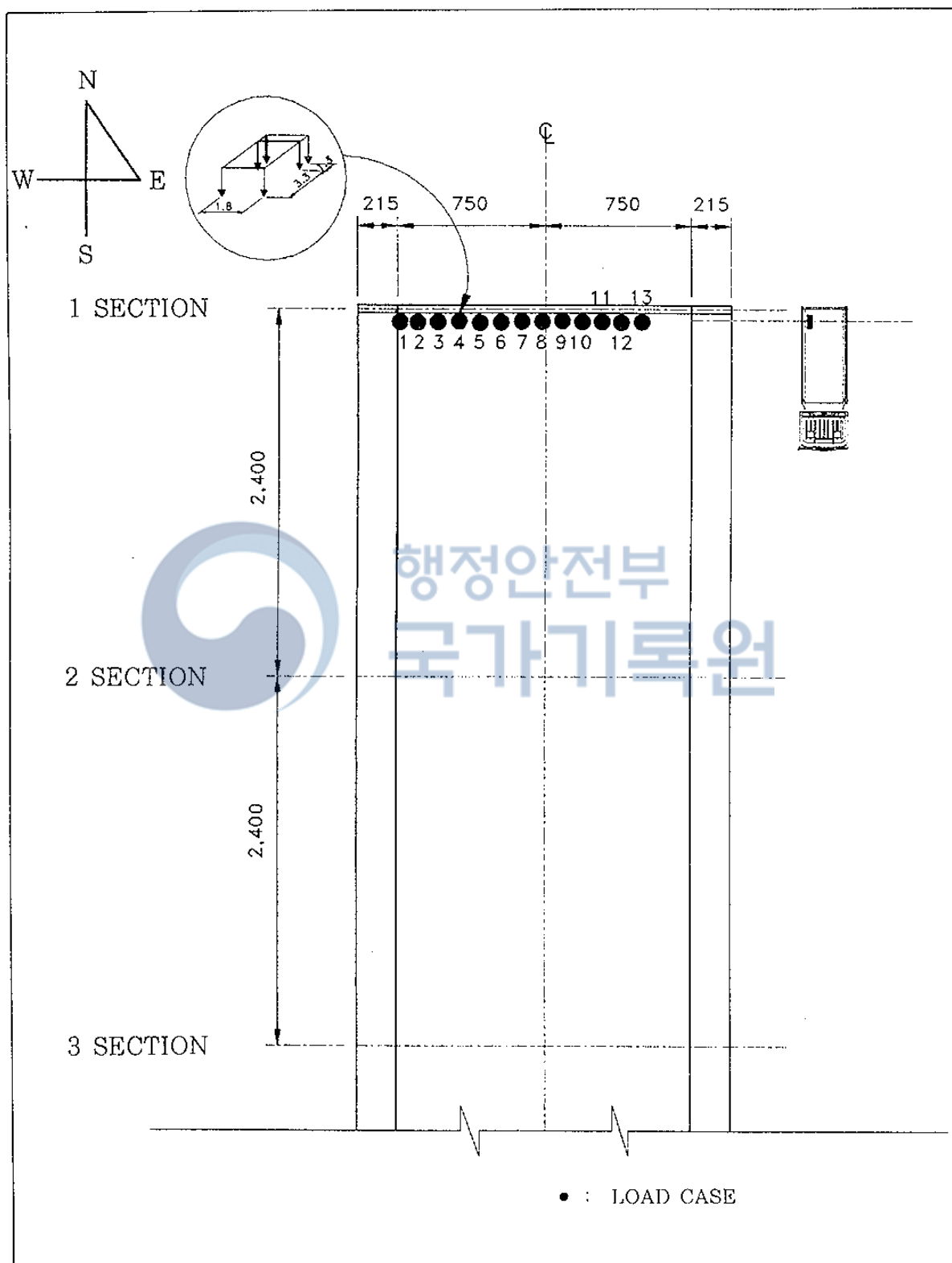
(그림 4-31) Load Case 1-1~1-11



(그림 4-32) Load Case 1-12~1-14



(그림 4-33) Load Case 2-1 ~ 2-12

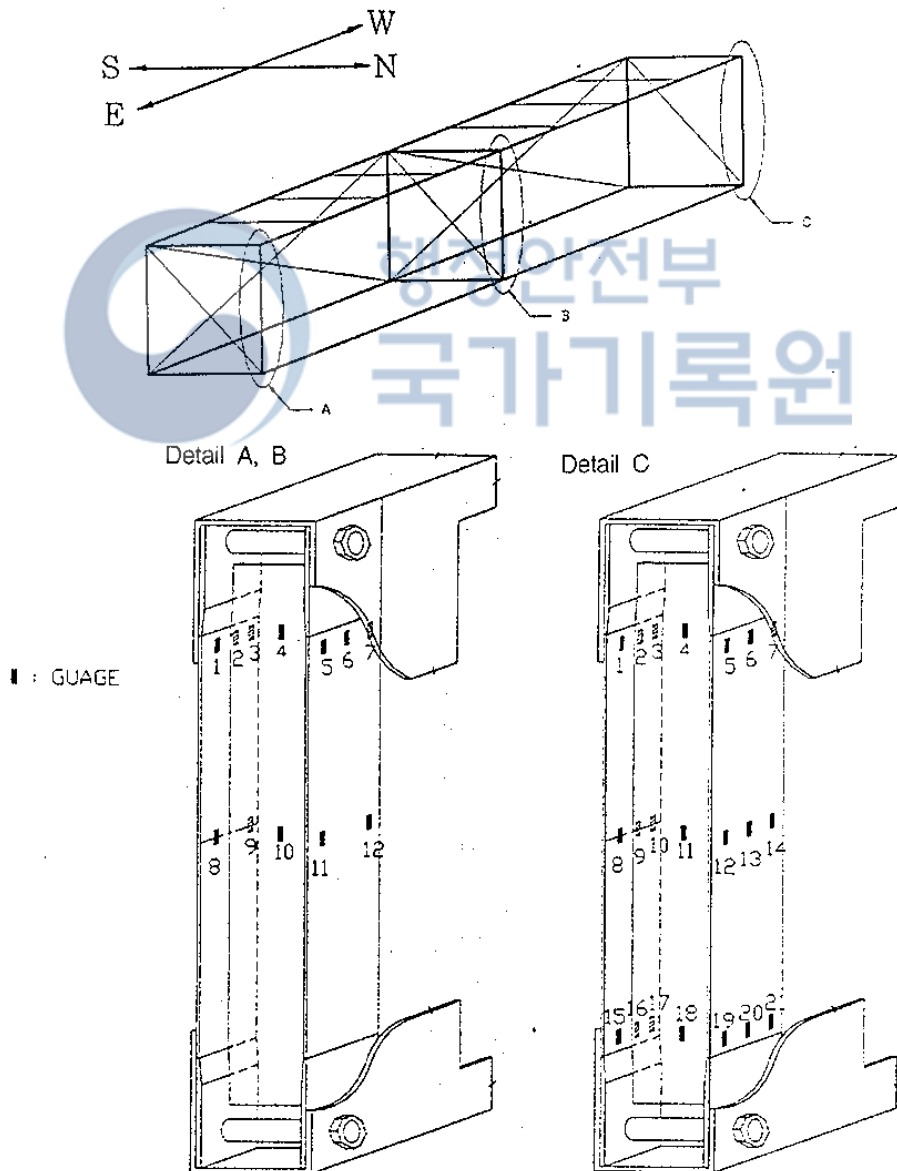


(그림 4-34) Load Case 3-1 ~ 3-13

(2) 센서부착위치

① 단면 ①

세개의 편연결 수직재의 상·하 용접부 단면, 중앙단면 등 세개의 단면에 대해 각각 한단면당 7개의 스트레인게이지를 부착하여 2차응력 및 국부응력의 효과를 계측할 수 있도록 하였다. (그림 4-35)와 (표 4-21)에는 단면①의 스트레인게이지 부착위치를 나타내었다.



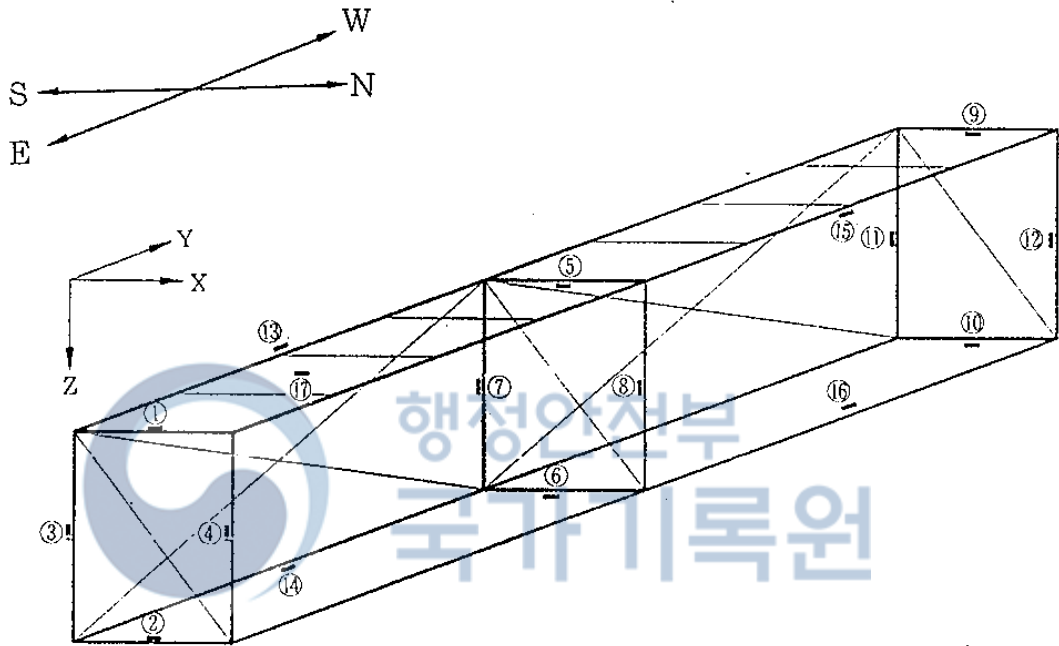
(그림 4-35) 게이지 부착위치(단면①)

(표 4-21) 단면① 게이지 부착위치

위 치		게이지 번호		부 착 위 치
서 측	상 단	WUFE	1,3	용접부 1cm 하단, 동측플랜지 끝단에서 5cm
			2	용접부 1cm 하단, 동측플랜지 중앙
		WUW	4	용접부 1cm 하단, 복부 중앙
		WUFW	5,7	용접부 1cm 하단, 서측플랜지 끝단에서 5cm
			6	용접부 1cm 하단, 서측플랜지 중앙
	중 앙	WMFE	8,10	편연결 수직재 중앙, 동측플랜지 끝단에서 5cm
			9	편연결 수직재 중앙, 동측플랜지 중앙
		WMW	11	편연결 수직재 중앙, 복부 중앙
		WMFW	12,14	편연결 수직재 중앙, 서측플랜지 끝단에서 5cm
			13	편연결 수직재 중앙, 서측플랜지 중앙
	하 단	WLFE	15,17	용접부 1cm 상단, 동측플랜지 끝단에서 5cm
			16	용접부 1cm 상단, 동측플랜지 중앙
		WLW	18	용접부 1cm 상단, 복부 중앙
		WLFW	19,21	용접부 1cm 상단, 서측플랜지 끝단에서 5cm
			20	용접부 1cm 상단, 서측플랜지 중앙
중 앙	상 단	CUFE	1,3	용접부 1cm 하단, 동측플랜지 끝단에서 5cm
			2	용접부 1cm 하단, 동측플랜지 중앙
		CUW	4	용접부 1cm 하단, 복부 중앙
		CUFW	5,7	용접부 1cm 하단, 서측플랜지 끝단에서 5cm
			6	용접부 1cm 하단, 서측플랜지 중앙
	중 앙	CMFE	8,9	편연결 수직재 중앙, 동측플랜지 끝단에서 5cm
		CMF	10	편연결 수직재 중앙, 복부 중앙
		CMFW	11,12	편연결 수직재 중앙, 서측플랜지 끝단에서 5cm
동 측	상 단	EUFE	1,3	용접부 1cm 하단, 동측플랜지 끝단에서 5cm
			2	용접부 1cm 하단, 동측플랜지 중앙
		EUW	4	용접부 1cm 하단, 복부 중앙
		EUFW	5,7	용접부 1cm 하단, 서측플랜지 끝단에서 5cm
			6	용접부 1cm 하단, 서측플랜지 중앙
	중 앙	EMFE	8,9	편연결 수직재 중앙, 동측플랜지 끝단에서 5cm
		EMW	10	편연결 수직재 중앙, 복부 중앙
		EMFW	11,12	편연결 수직재 중앙, 서측플랜지 끝단에서 5cm

② 단면②

상현재, 하현재, 수직재 등 트러스 각부재의 활하중에 의한 변형율을 계측하기 위하여 스트레인게이지를 부착하였으며, (그림 4-36) 및 (표 4-22)에 부착위치를 나타내었다.



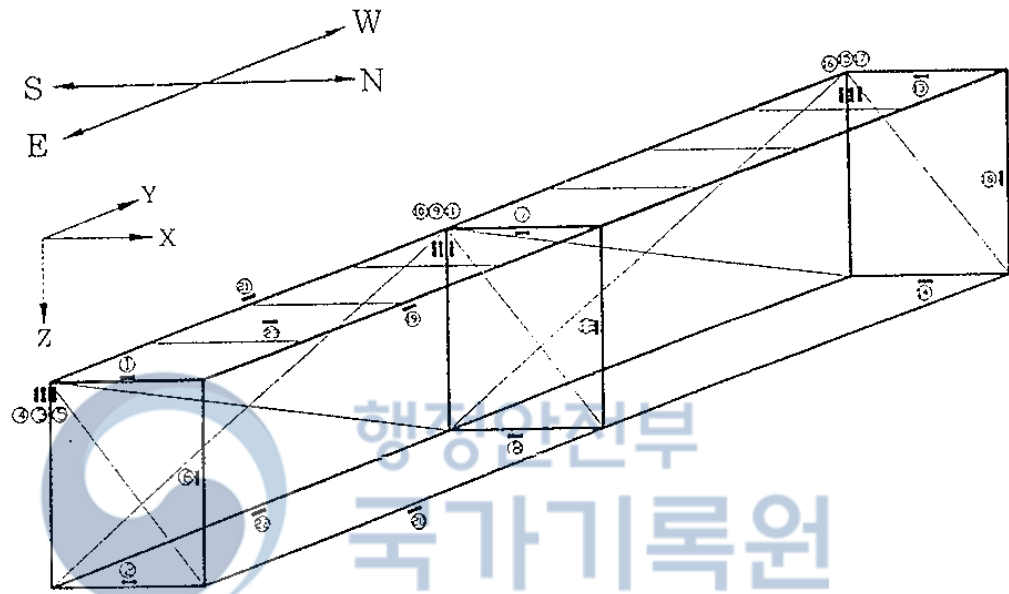
(그림 4-36) 게이지 부착위치(단면②)

(표 4-22) 단면② 게이지 부착위치

부재명	게이지번호		부착위치
상현재	1, 5, 9		중앙부(web)
하현재	2, 6, 10, 수직처짐		
수직재	3, 4, 7, 8, 11, 12		
가로보	상단	13, 15	중앙부(하부플랜지)
	하단	14, 16	
슬래브(철근)	17		중앙부(주철근)

③ 단면③

상현재, 하현재, 수직재 등 트리스 각부재의 활하중에 의한 변형율을 계측하기 위하여 스트레인게이지를 부착하였으며, (그림 4-37) 및 (표 4-23)에 부착위치를 나타내었다.



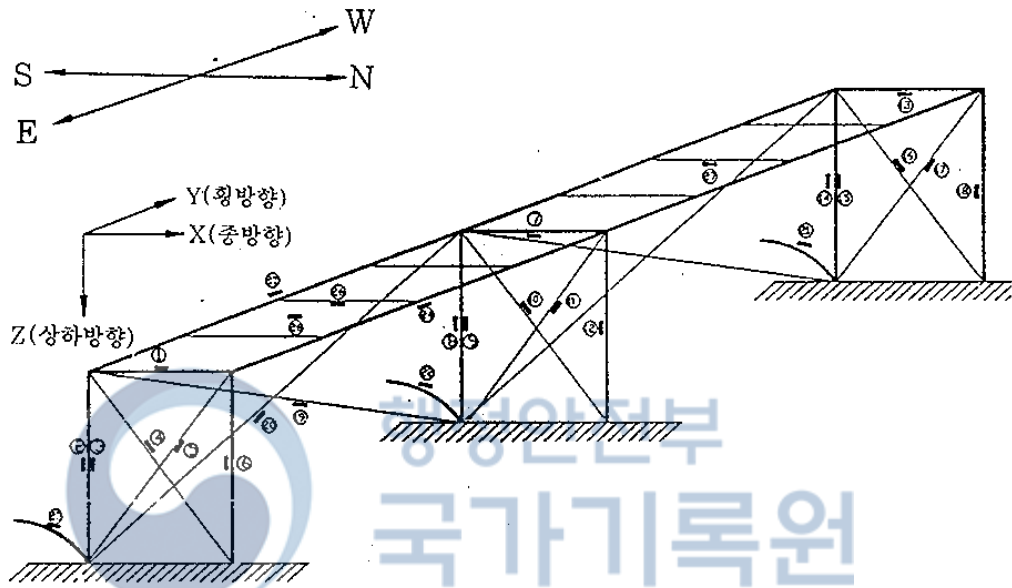
(그림 4-37) 게이지 부착위치(단면③)

(표 4-3) 단면③ 게이지 부착위치

부재명	게이지번호		부착위치
상현재	1, 7, 13		중앙부(web)
하현재	2, 8, 14		
수직재	6, 12, 18		
수직재 (Hinge 부분)	동측flange	4, 10, 16,	용접부 1cm 하단
	서측flange	5, 11, 17	
	web	3, 9, 15	
가로보	상단	19, 21	중앙부(하부플랜지)
	하단	20, 22	
슬래브(철근)	23		중앙부(주철근)

④ 단면④

상현재, 하현재, 수직재 등 트러스 각부재의 활하중에 의한 변형율을 계측하기 위하여 스트레인게이지를 부착하였으며, (그림 4-38) 및 (표 4-24)에 부착위치를 나타내었다.



(그림 4-38) 단면④의 게이지 부착단면

(표 4-24) 단면④ 게이지 부착위치

부재명	게이지번호	부착위치
상현재	1, 7, 13	중앙부(web)
하현재(첸틸레버부분)	23, 22, 21	
수직재	2, 3, 6, 8, 9, 12, 14, 15, 18	
사재	4, 5, 10, 11, 16, 17	web
세로보	26, 27	중앙부(하부플랜지)
가로보	24, 25	중앙부(하부플랜지)
브레이싱	19, 20	중앙부
슬래브(철근)	28	중앙부(주철근)

(3) 시험결과 및 고찰

① 수직재 응력분포 형상

(그림 4-39 ~ 4-41)에는 서측, 중앙, 동측 수직재의 응력분포형상을 나타내었다. 이로 부터 다음과 같은 점들을 알 수 있었다.

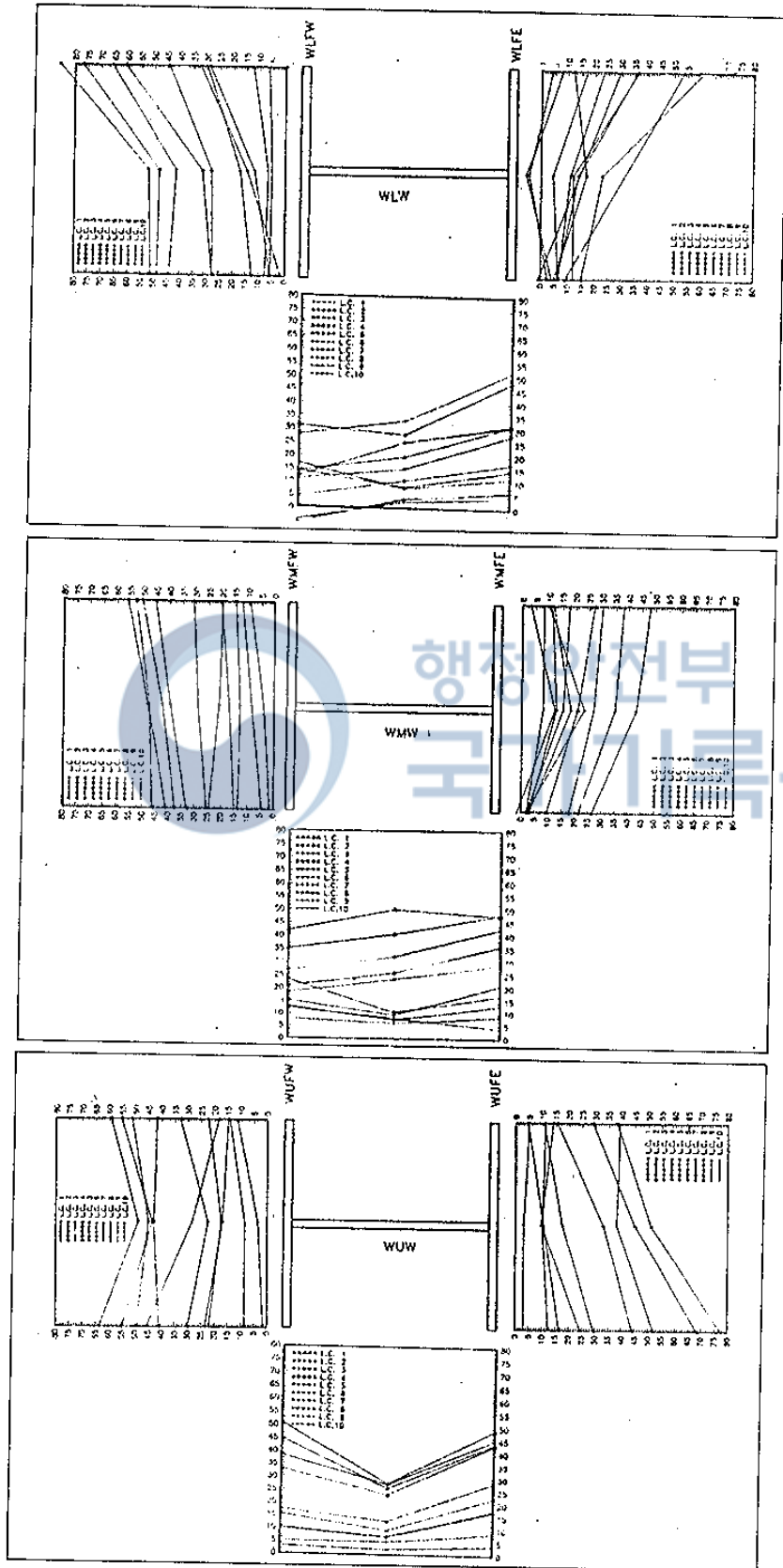
가. 시험하중에 의한 최대응력은 서측수직재의 상·하부 용접부의 플랜지 끝단에서 발생하였으며 그 크기는 상단에서 78kg/cm^2 , 하단에서 87kg/cm^2 으로 측정되었다.

나. 교축직각 방향 응력분포 경향

수직재의 교축직각 방향의 응력분포는 웨브단면을 통하여 살펴볼 수 있는데 서측수직재를 예로 할때 상·하 용접부 단면은 중앙단면에 비하여 응력변화의 구배가 상대적으로 심한 것을 알 수 있었다. 이것은 용접부에 국부응력의 효과가 발생하고 웨브의 끝단이 자유단인 것에 기인하는 것으로 판단된다.

다. 교축방향의 응력분포 경향

수직재의 교축방향 응력분포 경향은 플랜지의 변형을 값을 통하여 살펴볼 수 있다. 플랜지 끝단의 응력차이는 중앙단면에서 $8\sim 15\text{kg/cm}^2$ (WMFW의 LC 1, 2, 3의 경우)이며, 용접부 단면에는 $13\sim 40\text{ kg/cm}^2$ ~ (WUFE의 LC 1, 2, 3의 경우)와 $21\sim 36\text{ kg/cm}^2$ (WLFW의 LC 1, 2, 3의 경우)로서 상·하 용접부 단면의 차이가 상대적으로 큰 것을 알 수 있었다. 이로 부터 교축방향의 응력변화 경향도 상·하 용접부가 국부응력의 효과에 의하여 중앙단면 보다 구배가 큰 것을 알 수 있었다.

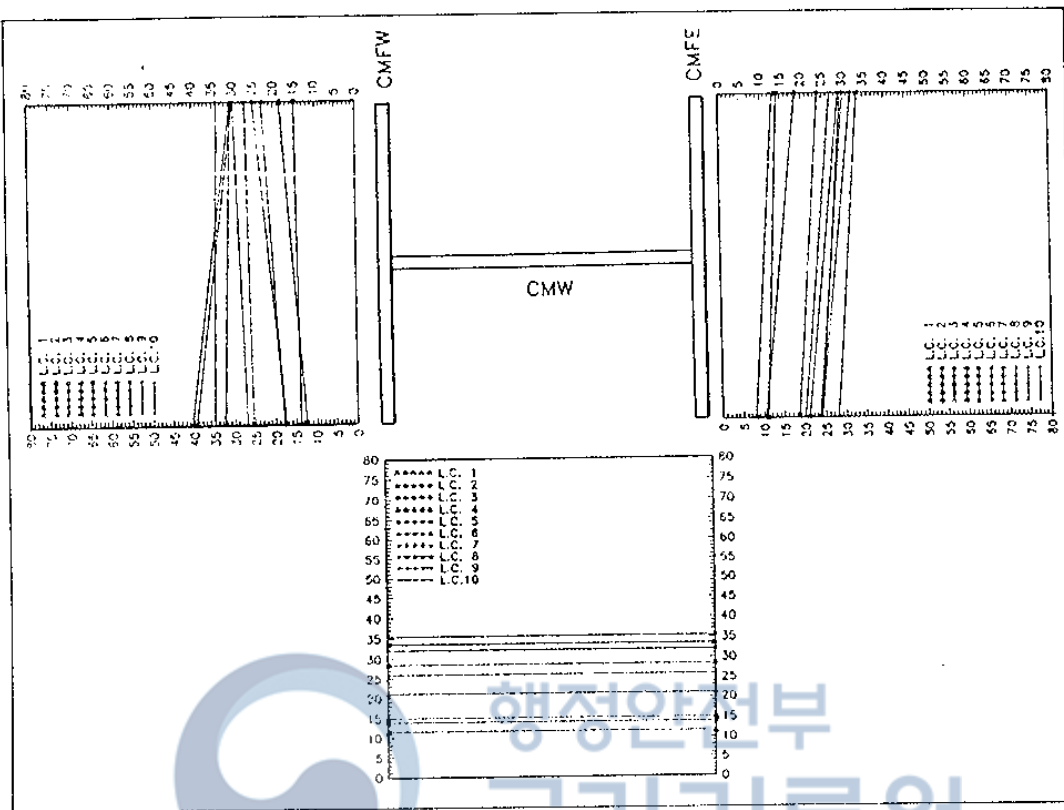


(C) 하부 용접부 단면

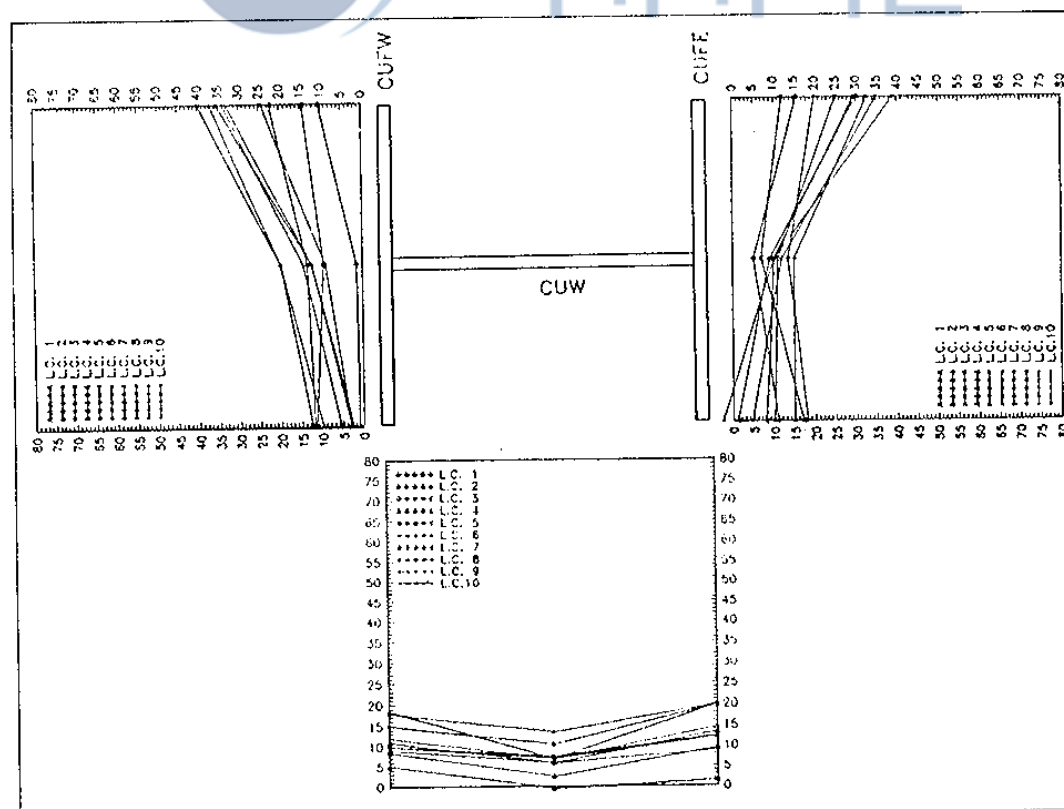
(B) 중앙단면

(A) 상부 용접부 단면

(그림 4-39) 서측수직재의 응력분포 형상

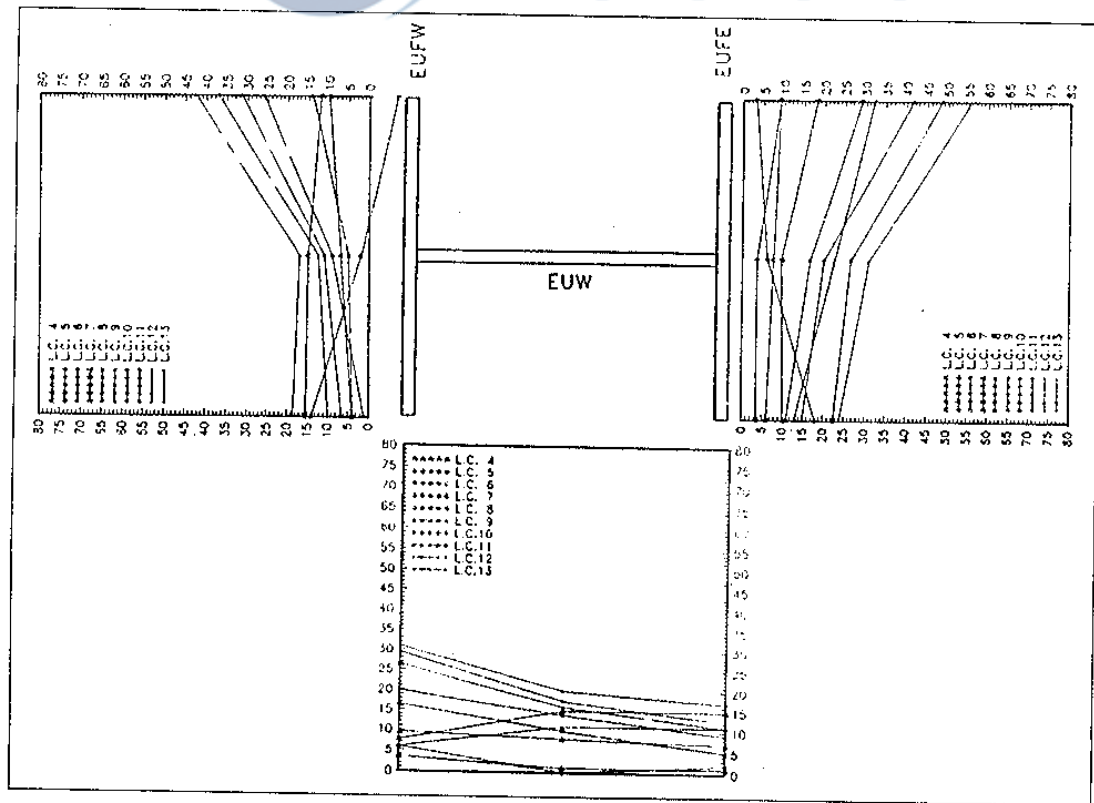


(B) 중앙단면

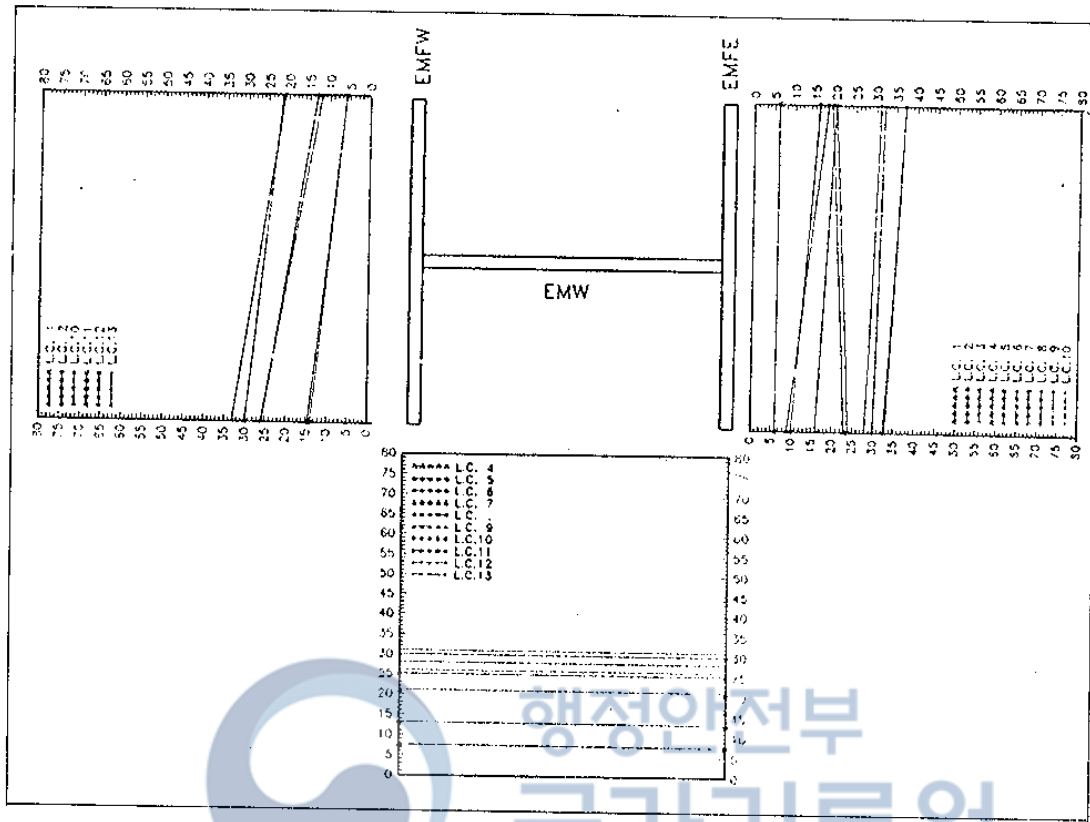


(A) 상부 용접부 단면

(그림 4-40) 중앙수직제의 인력분포 형상



(A) 상부 용접부 단면



(B) 중앙단면

(그림 4-41) 동축수직제의 응력분포 형상

(a) 상부 용접부 단면

(b) 중앙단면

(c) 하부 용접부 단면

(그림 4-40) 중앙수직재의 응력분포 형상

(a) 상부 용접부 단면

(b) 중앙단면

(그림 4-41) 동측수직재의 응력분포 형상

(a) 상부 용접부 단면

(b) 중앙단면

② 수직재 하중분배

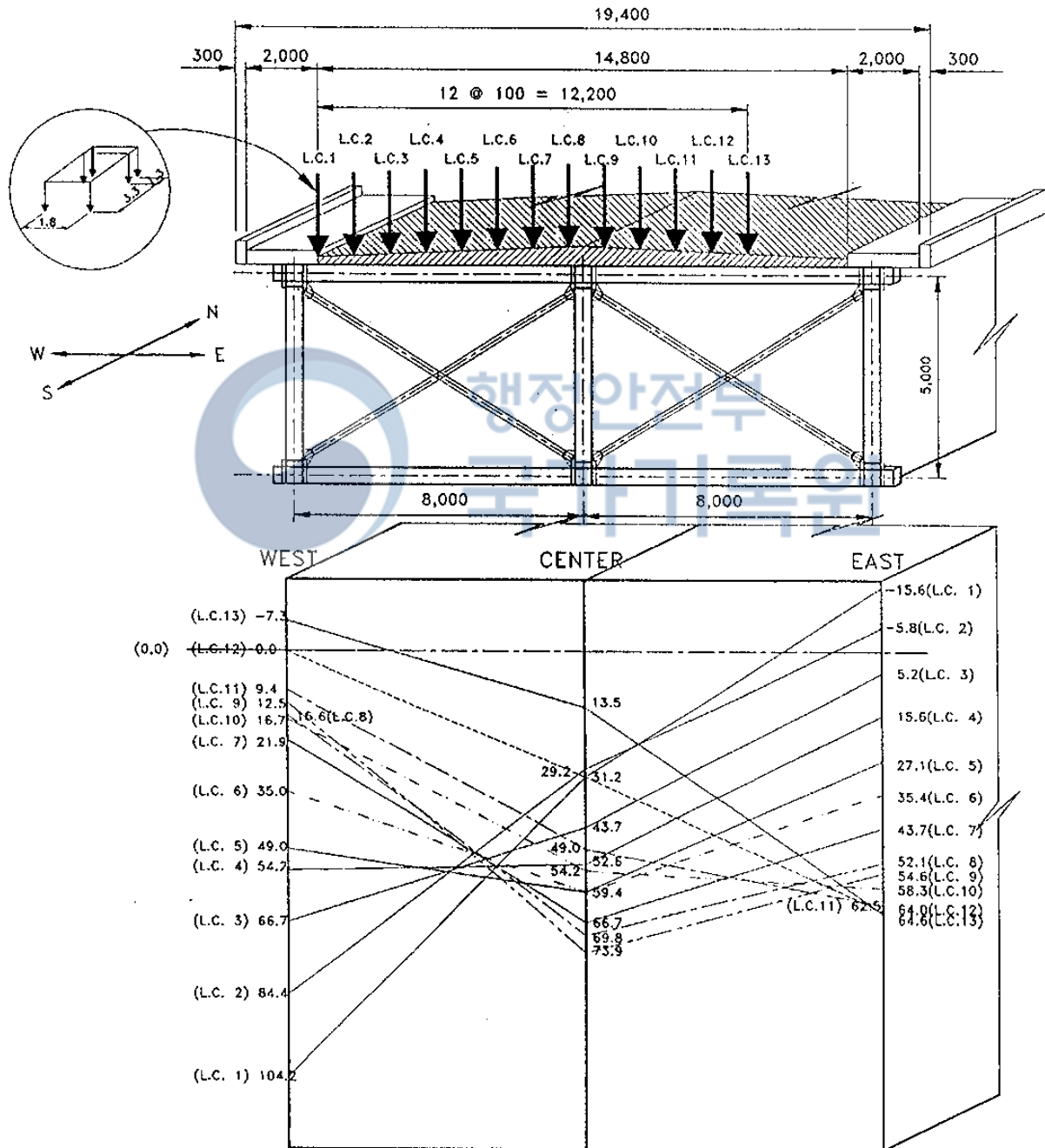
(그림 4-42)에는 시험하중을 서쪽에서 동쪽으로 1m씩 이동시키는데 따른 세개 수직재의 하중분배 형상을 중앙단면 복부의 응력을 기초로 나타내었다. 이로부터 다음과 같은 점들을 알 수 있었다.

가. 편심하중에 대한 수직재의 하중분배 특성을 살펴보면 대칭하중으로서 LC2와 LC13을 비교할 때 LC2에서 서측수직재가 84.4kg/cm^2 , LC13에서 동측수직재가 64.6kg/cm^2 으로 서측수직재가 31% $\{(84.4-64.6)/64.6\}$ 정도 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

나. 최대편측 재하시 상대편의 수직재는 -7.3kg/m^2 과 -15.6 kg/m^2 의 압축응력이 발생되는 것을 알 수 있었다.

다. 서측 편심재하의 경우 중앙선 재하보다 141%(104/73.9)만큼 편심효과가 발생함을 알 수 있다. 따라서 동일하중에 대해서도 동, 서 양측의 수직재의 응력이 더욱 크게 발생하게 되며, 특히 중차량들은 하위차선을 주로 통행한다고 볼 때 양측수직재는 중앙수직재보다 상대적으로 큰 피로하중을 받고 있었던 것으로 사료된다.

라. 결과적으로 동일하중에 의한 피로응력 범위의 크기는 서측수직재 > 동측수직재 > 중앙수직재 순인 것으로 사료된다.



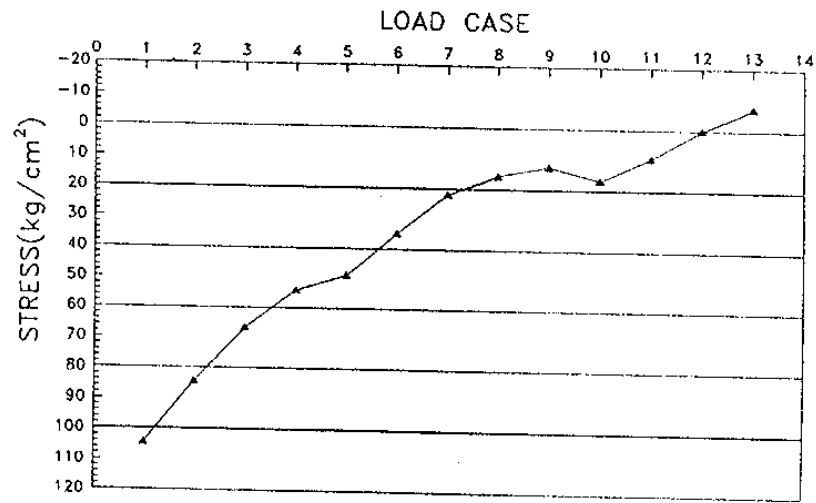
(그림 4-42) 수직재 하중분배

③ 수직재의 횡방향 영향선

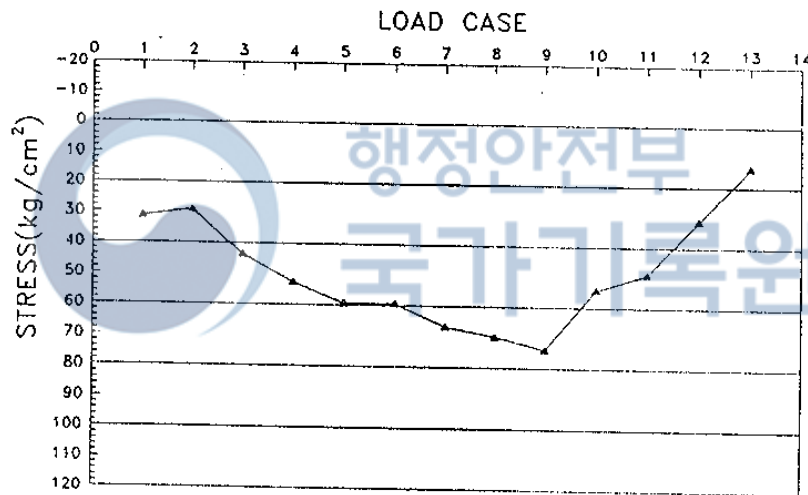
(그림 4-43~4-45)에는 수직재의 횡방향영향선을 나타내었다. 이로 부터 다음과 같은점을 알 수 있었다.

가. 서측수직재와 동측수직재의 횡방향영향선 곡선을 비교하면 우선 서측수직재는 위로 볼록한 곡선, 동측수직재는 아래로 볼록한 곡선을 이룬다. 따라서 서측수직재는 편심하중에 의한 영향이 동측수직재에 비하여 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

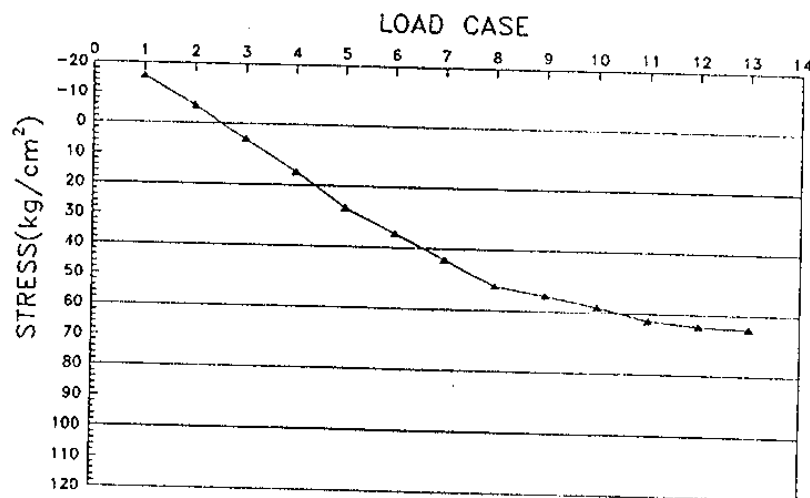
나. 양쪽 수직재는 편측재하시 상대편 수직재에 압축효과를 발생시키는 반면 중앙수직재는 항상 인장효과만을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 최대종거는 중앙수직재가 0.45인 반면 서측수직재는 0.68로서 동일 하중에 의해서 151%($0.68/0.45$) 만큼 서측수직재의 편심효과가 큰 것으로 알 수 있었다.



(그림 4-43) 서측수직재의 횡방향 영향선



(그림 4-44) 중방수직재의 횡방향 영향선



(그림 4-45) 동측수직재의 횡방향 영향

4-7-4 동적재하시험

(1) Load Case 및 분석항목

동적재하시험은 2차에 걸쳐 수행하였으며 시험의 세부내용 및 분석항목은 다음과 같다.

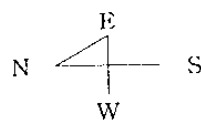
(표 4-21) 동적재하시험의 내용

시험종류	측정 항목	위 치	Load Case 횟수	분석대상	분 석 항 목
1 차	처 짐 가속도	단면 ② 단면 ①, ②	20회	대상부재 전 체	• 처짐-시간곡선 • 진동특성
2 차	변형율	단면 ①	7회	편 연 결 수 직 재	• 종방향 영향선 • 충격계수 • 고유진동수

(2) 센서부착위치

① 1차 시험

1차 동적재하시험에서는 처짐 및 가속도를 측정하였으며 센서 부착 위치는 다음과 같다.



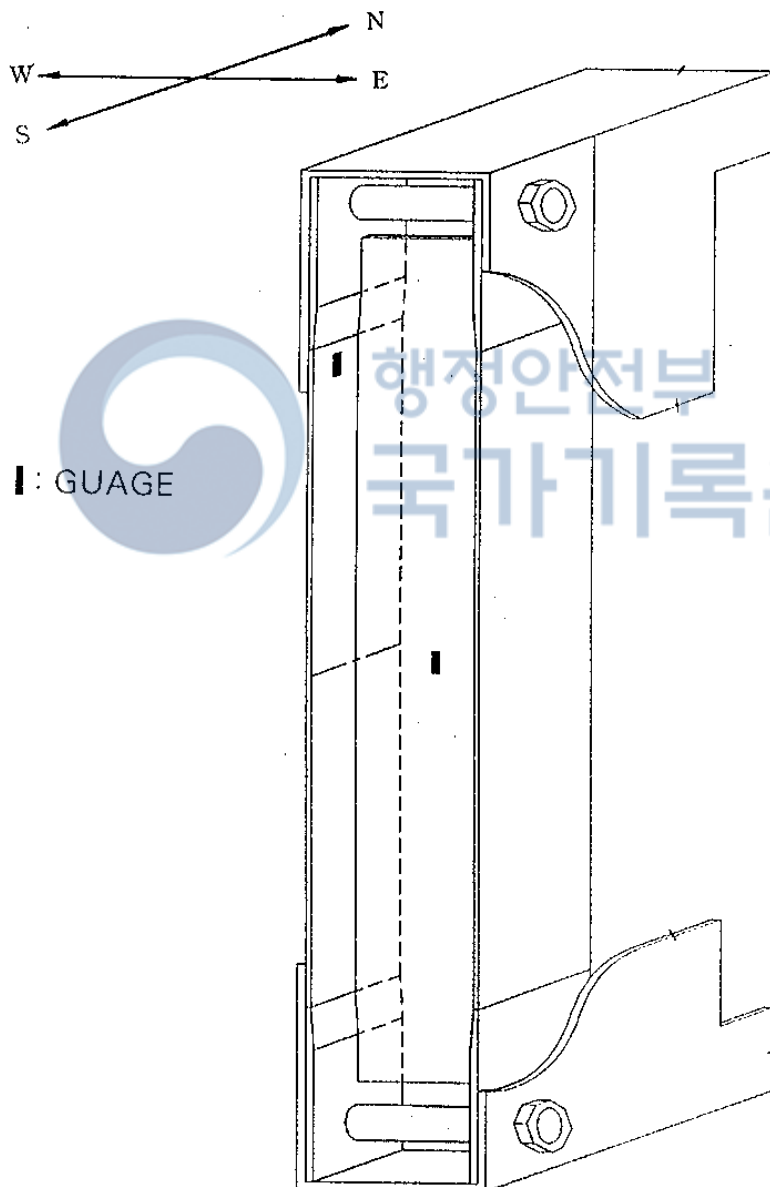
단면① 단면② 단면③ 단면④
 힌지 중앙 힌지

○ : 가속도계 1g (상하방향)
 △ : 처짐계 100mm(상하방향)

(그림 4-46) 센서부착위치

② 2차 시험

2차 동적제하시험에서는 편연결 수직재의 응력-시간 곡선을 계측하였으며, 센서 부착위치는 다음과 같다



(그림 4-47) 센서부착위치

(3) 분석 및 고찰

여기서는 편연결 수직재에 대한 사항만을 기술하였으며 기타 내용에 대해서는 부록에 수록하였다.

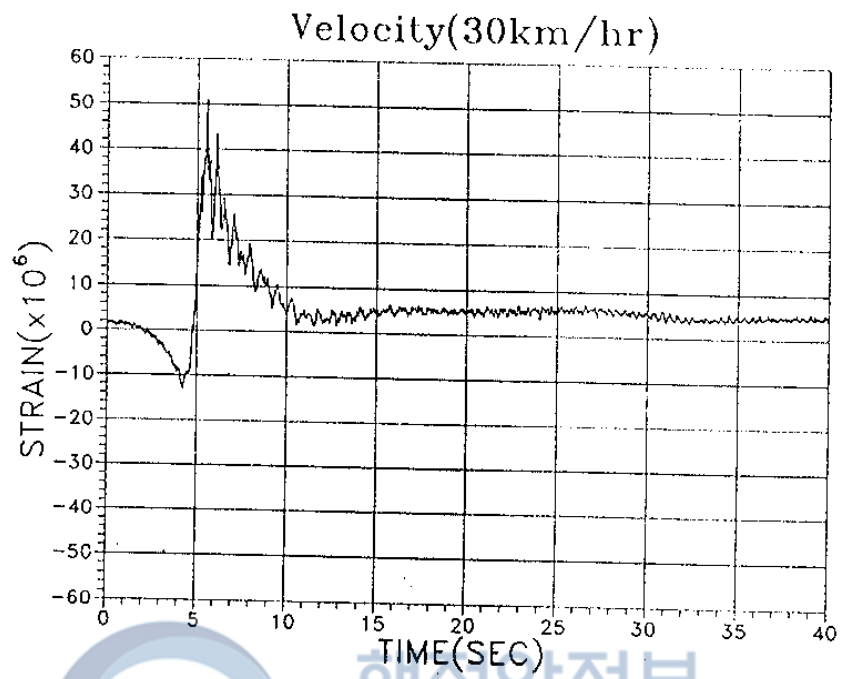
① 변형율-시간 곡선

(그림 4-48)에서는 편연결 수직재의 중앙단면 복부에 대한 대표적 변형율 시간곡선을 나타내었다. 이것은 시험차량을 중앙선상으로 주행시킨 것으로서 최대응력범위가 동적주행시험에서는

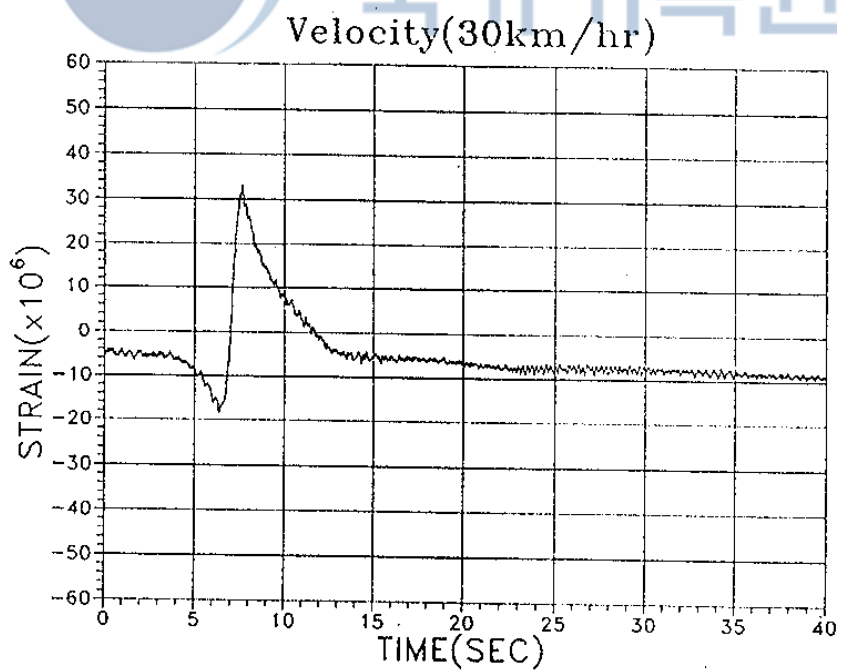
$$\sigma = E \cdot \varepsilon = (2.08 \times 10^6) \times (53 \times 10^{-6}) = 110 \text{kg/m}^2,$$

각목충격시험에서는 $\sigma = E \cdot \varepsilon = (2.08 \times 10^6) \times (67 \times 10^{-6}) = 139 \text{kg/m}^2$ 이 되는 것을 보여주고 있다.

따라서 36.4ton 덤프트럭 1대의 중앙선 주행시 중앙수직재의 복부가 받는 응력범위는 충격효과의 범위를 고려할 때 110~139kg/m²인 것을 알 수 있다.



(a) 각목충격시험



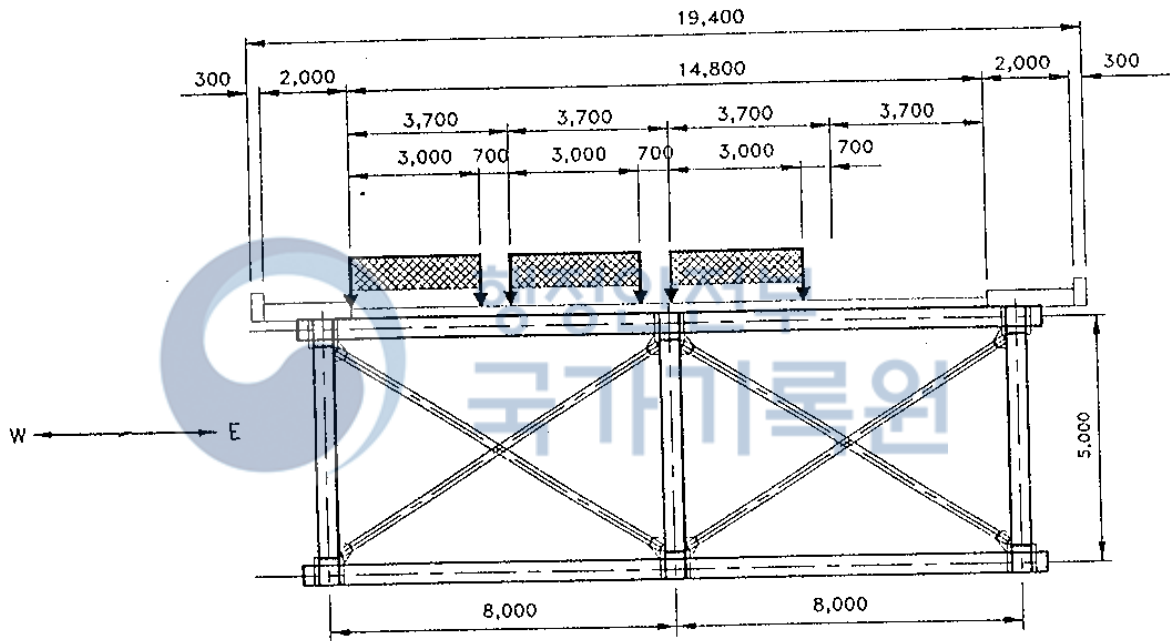
(b) 주행시험

(그림 4-48) 변형율-시간 이력곡선(강북-강남)

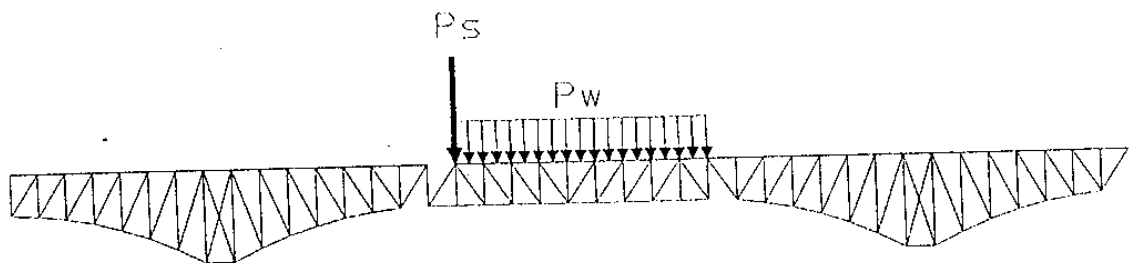
4-7-5 내하력 평가

(1) 설계하중

편연결 수직재에 최대 인장력을 발생시키기 위한 설계활하중은 도로 교시방서 공동편 2-3절에 의거하여 재하하였으며 재하방법을 도식적으로 표현하면 (그림 4-49)와 같다.



(a) 횡방향



(b) 종방향

(그림 4-49) 설계활하중 재하방법(서측수직재)

한편, 구조해석은 범용 구조해석 프로그램인 SAP90을 이용하여 평면해석을 수행하였으며 3차선 동시재하에 의한 하중횡분배는 실질적인 값을 사용하기 위하여 본 시험에서 계측된 값인 (그림 4-43~4-45)의 각 수직재의 횡방향 영향선을 기초로 하였다. (표 4-22)에는 서측수직재에 대한 설계 사하중효과 및 설계 활하중효과 해석결과를 나타내었다.

(표 4-22) 설계하중효과

설계하중효과		축 력(ton)	
		외측수직재	중앙수직재
사 하 중		125.331	121.155
활 하 중	DL-18	58.719	85.342
	DL-24	78.424	113.219

(2) 응답비

구조물 실응답비란 평면트러스 해석에 의한 해석치와 재하시험을 통한 실측치의 비를 말하며, 피로해석 및 내하력평가시 이용된다. (표 4-23)에는 응답비 해석결과를 나타내었는데 이로 부터 다음과 같은 점을 알 수 있었다.

가. 편연결수직재의 중앙단면 복부의 응력을 1차응력으로 보았을 때, 1차 응력의 응답비는 서측수직재가 0.796~1.046, 중앙수직재가 0.894~0.984, 동측수직재가 0.597~0.832로서 1보다 다소 작은 경향을 보인다. 이것은 구조물의 일반적인 경향으로써 편연결수직재의 1차응력 자체는 구조해석 결과와 크게 차이가 없음을 나타내는 것이다.

나. 편연결수직재의 최대응력은 상·하단 용접부의 플랜지에서 발생하는

바, 최대응력의 응답비는 서측수직재가 1.038~2.001, 중앙수직재가 0.971~1.163, 동측수직재가 1.068~1.345 로서 1보다 매우 큰 경향을 보인다. 이것은 수직재의 용접부에서는 2차응력 및 용접부의 국부응력에 의하여 설계응력 이상의 집중응력이 가해지고 있었던 것을 알 수 있었다.

다. 내하력평가를 위한 응답비 K 는 최대응력을 기준으로 서측수직재에 대해서는 최대활하중 효과를 발생시키는 LC 1에 대한 $K=1.788$, 중앙수직재 및 동측수직재는 최대응력비인 $K=1.163$ 과 $K=1.345$ 를 취하였다.



행정안전부
국가기록원

(표 4-23) 수직제의 응답비

Load Case		Load Case (단위 : kg/cm ²)											
위 치	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
서 측	측정치	104.2	84.4	66.7	54.2	49.0	35.0	21.9	15.6	12.5	16.7	9.4	-7.3
	Peak응력	178.1	160.4	137.5	127.1	92.7	67.7	62.5	60.4	30.2	26.0	21.9	7.3
	해 석 치	99.6	102.5	83.7	63.5	51.9	38.9	24.5	15.9	12.9	18.8	11.6	-12.9
	1차응력	1.046	0.823	0.796	0.853	0.943	0.900	0.892	0.982	0.962	0.890	0.811	0.562
	Peak응력	1.788	1.565	1.642	2.001	1.783	1.737	2.546	3.803	2.324	1.385	1.889	-0.562
	1차응력	31.2	29.2	43.7	52.6	59.4	59.4	66.7	69.8	73.9	54.2	49.0	13.5
중 앙	측정치	35.4	32.3	52.1	62.5	73.9	69.8	77.1	83.3	72.9	81.2	72.9	54.2
	해 석 치	30.3	34.7	53.4	62.1	63.5	66.4	72.2	73.6	75.1	60.6	57.8	23.1
	1차응력	1.029	0.843	0.818	0.847	0.935	0.894	0.924	0.948	0.984	0.894	0.848	0.584
	Peak 응력	1.168	0.932	0.975	1.007	1.163	1.051	1.068	1.131	0.971	1.339	1.261	2.346
	1차응력	-15.6	-5.8	5.2	15.6	27.1	35.4	43.7	52.1	54.6	58.3	62.5	64.6
	Peak 응력	30.2	29.2	14.6	33.3	33.3	37.5	47.9	60.4	66.7	86.4	101.0	115.6
동 측	해 석 치	-14.4	-5.7	7.2	18.8	28.9	38.9	47.6	54.9	56.3	64.7	75.1	108.3
	1차응력	1.080	1.004	0.720	0.831	0.937	0.908	0.917	0.950	0.970	0.897	0.832	0.597
	Peak 응력	-2.092	-5.053	2.022	1.774	1.153	0.962	1.005	1.101	1.185	1.330	1.345	1.068

(3) 내하력평가

내하력평가식은 다음과 같다.

$$RF = \frac{\sigma_a D_F - \sigma_D}{\sigma_L K (1 + i)}$$

$$P_n = RF \times \text{설계활하중}$$

여기서 RF = 내하율

P_n = 공용내하력

σ_a = 허용응력 (=1400kg/cm²)

σ_D = 설계사하중응력

σ_L = 설계활하중응력

i = 충격계수

K = 응답비(실측치/계산치)

DF = 노후손상계수(실 유효단면/설계단면)

이때 DF는 노후손상계수로서 트러스 각 부재의 경우 설계단면에 대한 실 유효단면의 비로서 정의될 수 있다. 여기서는 비파괴시험결과 실유효 단면이 8mm 용입인 경우 128cm²로 보고, DF=0.56(128/228)을 취 하였다. 세개의 편연결 수직재 용접부의 내하력평가를 위한 제계수는 (표 4-24)와 같다.

(표 4-24) 편연결수직재의 내하력평가를 위한 제계수

위 치	σ_D (kg/cm ²)	σ_L (kg/cm ²)		D_F	K	i	
		DL-18	DL-24			동적주행시험	각목충격시험
서 측	549.7	257.5	343.9	0.56	1.788	0.06	1.33
중 앙	531.4	374.3	496.6	0.56	1.163	0.06	1.33
동 측	549.7	257.5	343.9	0.56	1.345	0.06	1.33

앞절에서 언급한 내하력평가식과 제계수를 사용하여 각 수직재의 내하력평가를 산정하여 그 결과를 (표 4-25~4-26)에 나타내었다.

충격계수 $i = 1.06$ 인 경우 내하율은 설계하중 DL-18에 대하여 0.48 ~ 0.63, DL-24에 대하여 0.36 ~ 0.48로서 공용내하력은 DL-8.64 ~ DL-11.34의 범위에 있다. 따라서 서측수직재의 내하력은 DL-8.64로서 2등급의 설계하중인 DL-18 보다도 작은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다. 한편, 대상교량은 실제적으로 1등급(DL-24)로 운용되었다고 볼 때 공용내하력은 실제 통행하중에 비하여 크게 부족한 상태였음을 알 수 있었다.

한편, 교량의 노후도를 고려하여 충격계수를 $i = 1.33$ 으로 보았을 경우에는 전술한 $i = 1.06$ 으로 하였을 경우보다 내하력이 크게 감소하는 바, 공용내하력은 DL-6.84 ~ DL-9.18의 범위로 평가되었다.

(표 4-25) 내하력평가 결과($i = 1.06$ 으로 고려)

위 치	내 하 율(RF)		공용내하력(DL하중)
	설계하중	현행설계하중	
서 측	0.48	0.36	DL- 8.64
중 앙	0.54	0.41	DL- 9.72
동 측	0.63	0.48	DL-11.34

(표 4-26) 내하력평가 결과($i=1.33$ 으로 고려)

위 치	내 하 율(RF)		공용내하력(DL하중)
	설 계 하 중	현행설계하중	
서 측	0.38	0.28	DL-6.84
중 앙	0.44	0.33	DL-7.92
동 측	0.51	0.38	DL-9.18

4-7-6 요 약

정적 및 동적재하시험 결과중에서 편연결 수직재에 대한 분석내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 수직재 응력분포 형상

① 시험하중에 의한 최대응력은 서측수직재의 상·하부 용접부의 플랜지 끝단에서 발생하였으며 그 크기는 상단에서 78kg/cm^2 , 하단에서 87kg/cm^2 으로 측정되었다.

② 교축직각 방향 응력분포 경향

수직재의 교축직각 방향의 응력분포는 웨브단면을 통하여 살펴볼 수 있는데 서측수직재를 예로 할때 상·하 용접부 단면은 중앙단면에 비하여 응력변화의 구배가 상대적으로 심한 것을 알 수 있었다. 이것은 용접부에 국부응력의 효과가 발생하고 웨브의 끝단이 자유단인 것에 기인하는 것으로 판단된다.

③ 교축방향의 응력분포 경향

수직재의 교축방향 응력분포 경향은 플랜지의 변형을 값을 통하여 살펴

볼 수 있다. 플랜지 끝단의 응력차이는 중앙단면에서 $8 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ (WM FW의 LC 1, 2, 3의 경우)이며, 용접부 단면에는 $13 \sim 40 \text{ kg/cm}^2$ (WU FE의 LC 1, 2, 3의 경우)와 $21 \sim 36 \text{ kg/cm}^2$ (WLFW의 LC 1, 2, 3의 경우)로서 상·하 용접부 단면의 차이가 상대적으로 큰 것을 알 수 있었다. 이로 부터 교축방향의 응력변화 경향도 상·하 용접부가 국부응력의 효과에 의하여 중앙단면 보다 구배가 큰 것을 알 수 있었다.

(2) 수직재 하중분배

- ① 편심하중에 대한 수직재의 하중분배 특성을 살펴보면 대칭하중으로서 LC2와 LC13을 비교할 때 LC2에서 서측수직재가 84.4 kg/cm^2 , LC13에서 동측수직재가 64.6 kg/cm^2 으로 서측수직재가 $31\% \{ (84.4 - 64.6) / 64.6 \}$ 정도 더 크게 나타남을 알 수 있었다.
- ② 최대편측 재하시 상대편의 수직재는 -7.3 kg/m^2 과 -15.6 kg/m^2 의 압축 응력이 발생되는 것을 알 수 있었다.
- ③ 서측 편심재하의 경우 중앙선 재하보다 $141\% (104/73.9)$ 만큼 편심 효과가 발생함을 알 수 있다. 따라서 동일하중에 대해서도 동, 서양측의 수직재의 응력이 더욱 크게 발생하게 되며, 특히 중차량들은 하위차선을 주로 통행한다고 볼 때, 양측수직재는 중앙수직재보다 상대적으로 큰 피로하중을 받고 있었던 것으로 사료된다.
- ④ 결과적으로 동일하중에 의한 피로응력 범위의 크기는
서측수직재 > 동측수직재 > 중앙수직재 순인 것으로 사료된다.

(3) 수직재의 횡방향 영향선

- ① 서측수직재와 동측수직재의 횡방향영향선 곡선을 비교하면 우선 서측수직재는 위로 볼록한 곡선, 동측수직재는 아래로 볼록한 곡선을 이룬다. 따라서 서측수직재는 편심하중에 의한 영향이 동측수직재에 비하여

상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

- ② 양쪽 수직재는 편측재하시 상대편 수직재에 압축효과를 발생시키는 반면 중앙수직재는 항상 인장효과만을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 최대 종거는 중앙수직재가 0.45인 반면 서측수직재는 0.68로서 동일하중에 의해서 151%(0.68/0.45) 만큼 서측수직재의 편심효과가 큰 것으로 알 수 있었다.

(4) 변형율-시간 곡선

시험차량을 중앙선상으로 주행시켰을 때 최대응력범위가 동적주행시험에서는

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = (2.08 \times 10^6) \times (53 \times 10^{-6}) = 110 \text{ kg/m}^2,$$

각목충격시험에서는 $\sigma = E \cdot \varepsilon = (2.08 \times 10^6) \times (67 \times 10^{-6}) = 139 \text{ kg/m}^2$ 으로 나타났다. 따라서 36.4ton 덤프트럭 1대의 중앙선 주행시 중앙수직재의 복부가 받는 응력범위는 충격효과의 범위를 고려할 때 110~139kg/m²인 것을 알 수 있다.

(5) 충격계수

주행속도별 충격계수의 크기는 주행시험에 의한 실측 충격계수는 시방서 식으로 주어지는 $i=0.17$ 보다 작은 0.06으로 분석되었다. 그러나 각목 충격시험의 경우에 있어서는 충격효과가 시방서 보다 큰 0.33으로 나타났다.

(6) 응답비

- ① 편연결수직재의 중앙단면 복부의 응력을 1차응력으로 보았을 때, 1차 응력의 응답비는 서측수직재가 0.796~1.046, 중앙수직재가 0.894~0.984, 동측수직재가 0.597~0.832로서 1보다 다소 작은 경향을 보인다. 이것은 구조물의 일반적인 경향으로서 편연결수직재의 1차응력 자체는 구조해석 결과와 크게 차이가 없음을 나타내는 것이다.

- ② 편연결수직재의 최대응력은 상·하단 용접부의 플랜지에서 발생하는 바, 최대응력의 응답비는 서측수직재가 1.038~2.001, 중앙수직재가 0.971~1.163, 동측수직재가 1.068~1.345로서 1보다 매우 큰 경향을 보인다. 이것은 수직재의 용접부에서는 2차응력 및 용접부의 국부응력에 의하여 설계응력 이상의 집중응력이 가해지고 있었던 것을 알 수 있었다.
- ③ 내하력평가를 위한 응답비 K 는 최대응력을 기준으로 서측수직재에 대해서는 최대활하중 효과를 발생시키는 LC 1에 대한 $K=1.788$, 중앙수직재 및 동측수직재는 최대응력비인 $K=1.163$ 과 $K=1.345$ 를 취하였다.

(7) 노후손상도

노후손상도 DF 는 트러스 각 부재의 경우 설계단면에 대한 실유효단면의 비로서 정의될 수 있다. 여기서는 비파괴시험결과 실유효단면이 8mm 용입인 경우 128㎢로 보고 $DF = 0.56(128/228)$ 을 취하였다.

(9) 내하력평가

- ① 충격계수 $i = 1.06$ 인 경우 내하율은 설계하중 DL-18에 대하여 0.48~0.63, DL-24에 대하여 0.36~0.48로서 공용내하력은 DL-8.64~DL-11.34의 범위에 있다. 따라서 서측수직재의 내하력은 DL-8.64로서 2등급의 설계하중인 DL-18 보다도 작은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있었다. 한편, 대상교량은 실제적으로 1등급(DL-24)로 운용되었다고 볼 때 공용내하력은 실제 통행하중에 비하여 크게 부족한 상태였음을 알 수 있었다.
- ② 교량의 노후도를 고려하여 충격계수를 $i = 1.33$ 으로 보았을 경우에는 전술한 $i = 1.06$ 으로 하였을 경우보다 내하력이 크게 감소하는 바, 공용내하력은 DL-6.84~DL-9.18의 범위로 평가되었다.

4-8 시험 결과의 요약

성수대교 붕괴원인을 규명하기 위하여 강재에 대한 화학성분 분석, 물성치 실험, 비파괴 시험, 파단면 분석, 피로 실험 등을 수행하고 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

- ① 화학성분 분석 결과, 사용된 강재는 SWS400B인 것으로 확인하였으며 용접재는 저수소계 용접봉을 사용한 것으로 추정하였다. 강재의 탄소당량과 Mn/S비를 가지고 판단할 때 용접성에는 별 문제가 없는 연강으로 판단되었다.
- ② 3개의 시편에 대한 인장강도 시험 결과, 항복강도는 3000 kg/cm^2 (294MPa), 극한인장강도는 4600 kg/cm^2 (451MPa)로 구조용 강재인 SS41 또는 SWS41 강재의 대표적 강성 범위 내에 있었다.
- ③ CVN 충격 시험 결과, 파괴인성이 좋은 Grade B 강재로 추정되었으며 저온인성치의 문제는 없는 것으로 판단되었다.
- ④ 3개의 시편을 사용하여 파괴인성 시험의 하나인 3점 굽힘시험으로 파괴인성치 $KQ \text{ AVG} = 62.16 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 를 구하였으나 시험편 두께조건을 만족시키지 못하였다.
- ⑤ 성수대교 중 붕괴되지 않은 실구조물에 계량된 트럭을 재하시켜 1차 응력에 대한 계산치와 실측치의 비인 평균응답비 0.7을 구하였다. 아울러 충격계수와 수직부재의 잔존내하력을 평가하였다.
- ⑥ 성수대교 수직부재에 사용된 강재와 같은 종류의 강재를 가지고 피로 시험을 위한 실물크기 시편을 시공시 용접조건과 같이 제작하여 DL-18 하중과 DL-24 하중에 상당하는 활하중 인장응력 범위를 작용시켜 피로 시험을 수행하였다. 설계도면과 같은 조건으로 완전 용입 용접된 시편도

1조 제작하여 DL-18 과 DL-24 하중을 가하였으나 시공조건과 같이 제작된 시편3조가 파단될 때까지 균열이 발생하지 않았다. 시공조건과 같이 부분용입된 시편에 설계하중인 DL-18 하중을 가하였을 때는 120만 사이클 전후에서 처음 균열이 발견되었고 256만 사이클에서 최종 파단이 일어난 것으로 추정되었다. 부분용입된 또 다른 시편에 DL-24 하중을 가하였을 때는 50만 사이클 전후에서 처음 균열이 발견되었고 최종파단은 99만 3천 사이클에서 일어난 것으로 간주하였다. 설계도면과 같은 조건으로 완전 용입된 시험체는 DL-18 하중 456만 사이클, DL-24하중 99.3만 사이클의 하중을 받았으나 전혀 균열이 발생되지 않았다.

- ⑦ 성수대교를 15년 동안 통과한 양방향 총 트럭수는 56,984,702대로서 이중 피로피해를 준 10톤 이상의 트럭은 양방향 37,300,000대로 추정되며 우리나라 교통량 중량분포 자료에 따라 수직부재에 작용하는 응력 Histogram을 작성하여 추정한 등가인장응력의 변동범위 S_{req} 는 교량 상에 트럭 한대만 있을 경우는 98.2kg/cm^2 이며 수직부재에 최대응력이 작용하도록 4차선 교폭에 다차선으로 재하하였을 경우는 224.8kg/cm^2 이었다.

5. 설계 내용 및 감정

5-1 개 요

본 교량은 주경간 120m의 게르버(Gerber)구조의 강트러스(Steel Truss) 교량으로, 고정트러스(Anchor Truss)구간 72.0m와 현수트러스(Suspended Truss) 구간 48.0m로 구성되어 있으며, 하부구조는 콘크리트 우물통 기초(Concrete Caisson)에 라멘 교각(Concrete Rahmen Pier)이다.

검토내용은 계획설계 내용에서 부터 구조계산서와 설계도면 분석, 구조계산을 통한 설계기준 준수여부를 감정하여, 설계상 하자여부 및 안전도를 판단하고 붕괴와의 관련여부를 검토한다.

5-2 교량 계획

5-2-1 교량 계획시의 배경 분석

본 교량의 설계시기는 1970년대 후반으로, 서울시의 날로 증가하는 교통량에 대처하기 위하여 성동구 왕십리와 강남쪽의 압구정동을 잇는 성수대로상의 한강을 횡단하는 교량이다. 설계 당시는 우리의 경제발전이 상당수준에 이르러 교량의 미관을 본격적으로 고려하기 시작하던 시기였으며, 국내 건설업체도 해외에 진출하면서 기술수준의 향상을 기하는 시기이다. 성수대교는 이러한 시대적 배경하에 국산자재의 사용과 교량형식의 선정시에 미관을 고려한 장경간 한강상 교량중 성산대교 다음으로 시도된 교량이다. 본 교량은 미관이 특히 강조된 교량으로서, 당시의 교량 형식 결정방법이 하향식 결정이 많았던 시기에 계획된 교량이다.

5-2-2 교량 계획 내용

계획내용중에서 하부구조 부분은 붕괴사고와 직접 연관이 없으므로 생략하고 상부구조 부분만 살펴보면 다음과 같다. 본 구조는 72.0m의 고정 트러스와 48.0m의 현수트러스로 구성된 경간 120.0m의 장대교이다. 지점부는 두개의 수직재를 교각에 묻어 고정(Anchor)시키고, 양측으로 36.0m씩 캔틸레버 트러스(Cantilever Truss)로 가설한 후, 나머지 48.0m를 현수트러스(Suspended Truss)로 연결한 게르버구조(Gerber Structure)이다. 이때 지지트러스(Anchor Truss)와 현수트러스(Suspended Truss)는 양단(혹은 상단만)이 편구조인 수직재로 연결하였다. 바닥틀은 3개의 주트러스를 가로보(Cross Beam)로 연결하고 주트러스 사이에 3개의 세로보(Stringer)를 설치하였다. 주트러스의 하부에는 횡브레이싱(Lateral Bracing), 트러스 사이에는 대각브레이싱(Diagonal Bracing)이 설치되어 있다. 이러한 바닥틀 구성부재 중 주트러스의 상현재와 세로보 상부 플랜지(Flange)에 전단연결재(Shear Conecter)를 설치하고 철근콘크리트 바닥을 타설하여 합성구조화(Composite Structure) 하였다. 구조부재는 전체적으로 강판을 용접연결한 플레이트거더(Plate Girder)이고 격점은 볼트로 연결되어 있다. 외판은 트러스의 높이가 지점부에서 11.0m이고 중앙부에서 5.0m인 변단면으로 상로 트러스 교량이다.

5-2-3 검토 사항

계획내용중 구조형식과 강구조제작 방식등에 대한 검토를 하면 아래와 같다.

가) 구조형식

본 교량에 사용된 게르버 구조형식은 교량형식 중에서 오래전부터 사용된 형식으로, 기초공사(특히 깊은 기초)의 어려움과 기초 침하등으로 인한 구조

물의 치명적인 손상을 피하고 부정정구조물의 설계 계산상의 어려움과 착오동을 방지하기 위하여 단순구조로 하기 위한 구조가 게르버구조이다. 이러한 게르버형식의 교량에서 지지트러스와 현수트러스의 연결부 수직재는 현수트러스에 재하되는 모든 하중이 집중되고 전달되는 통로로서 매우 중요한 부재이다. 또한 하나의 수직재의 파괴가 교량전체의 붕괴 원인이 될 수 있는 단경간경로구조물(Single-Load-Path Structure)이므로 수직재의 시공·유지관리에 특별한 주의가 필요한 구조이다.

나) 제작 방식

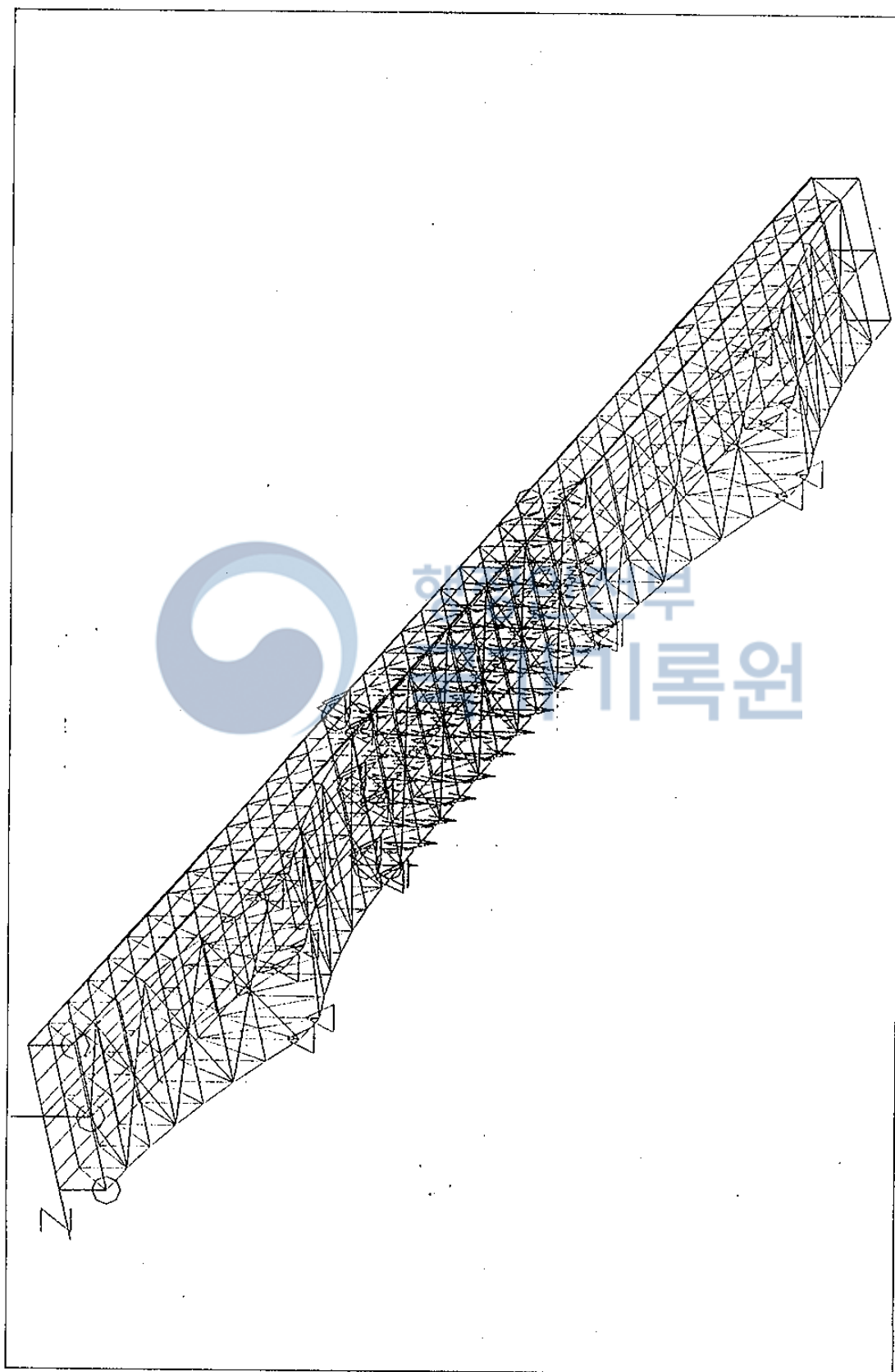
당시 건설현황은 국내 용접강재가 포항제철에서 처음으로 생산되기 시작하였고, 용접공장도 설립되어 국내 용접구조물이 제작되기 시작한 초기이다. 성수대교의 문제점은 강구조물의 설계·제작 기술 및 용접기술의 습득과 보급을 위한 충분한 시간을 두지 않고 무리한 돌관공사로 계획한 것이 문제점으로 판단된다.

5-3 설계 내용 검토

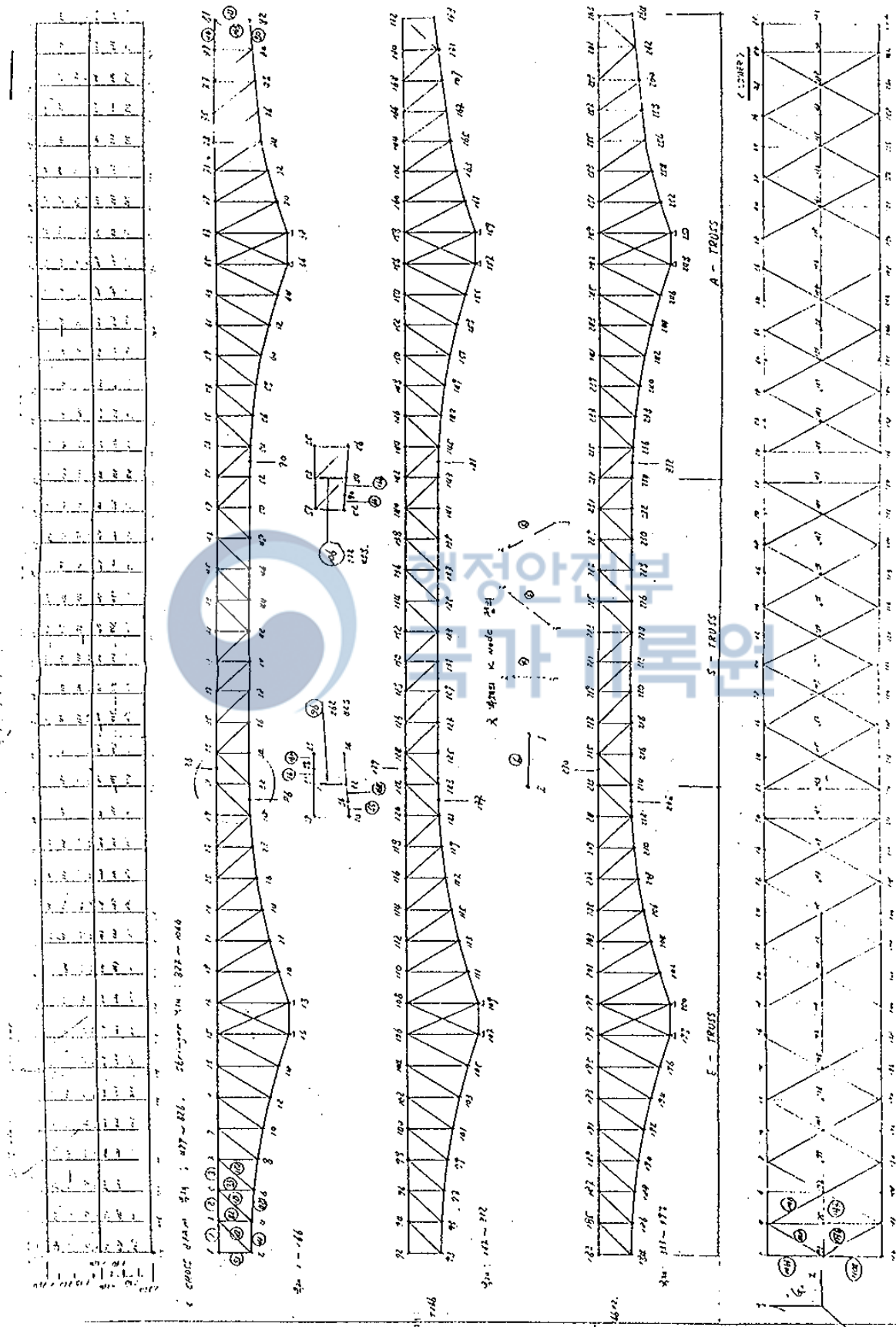
5-3-1 구조 해석 개요

구조계산서의 내용을 검토하기 위하여 구조계산을 실시한다. 설계시와 검토시의 해석방법은 다음과 같다.

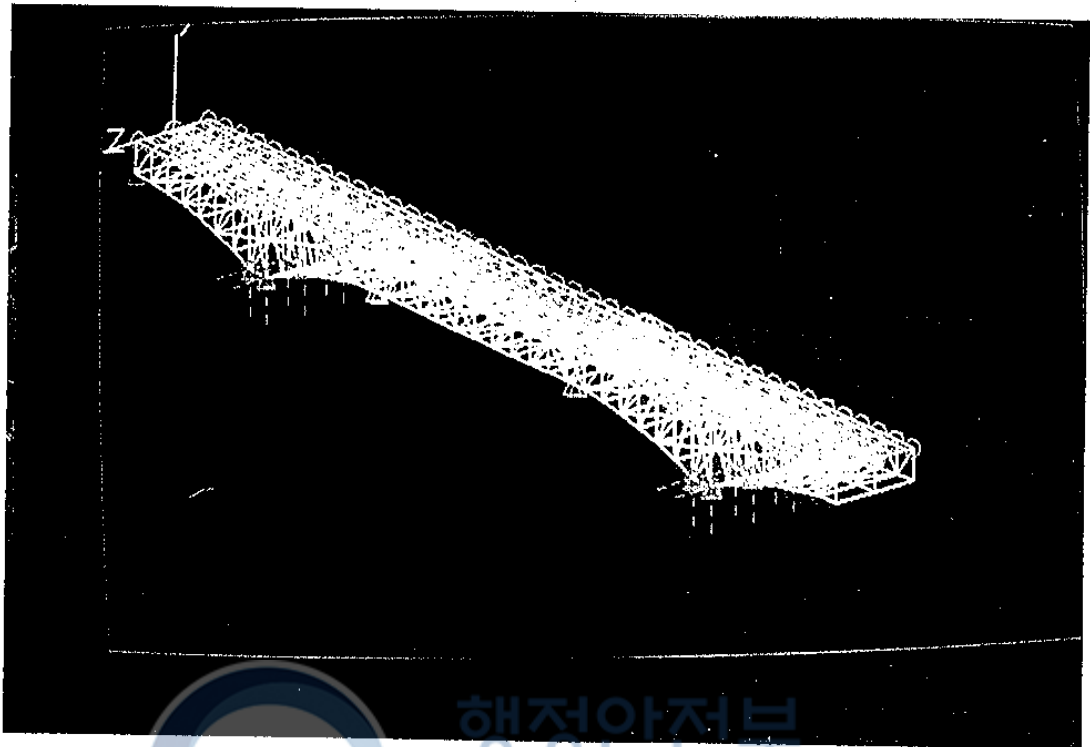
경 우	설 계 시	검 토 시
모 델 링 하 중 분 배 바닥판 (Slab)	2차원 구조 단순보 이론 고려하지 않음 (하중으로만 처리)	3차원 구조 횡방향 연속보 해석 평판요소로 모델 (비합성 구조)



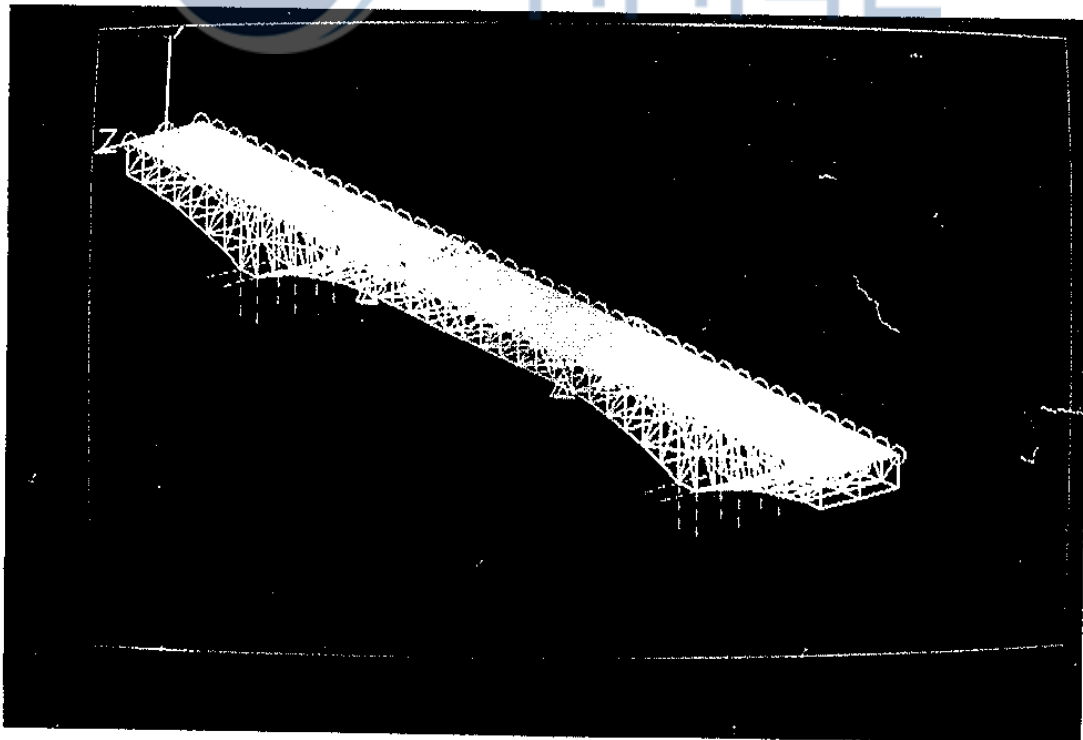
(그림 5-1) 연속트러스의 3차원 모델



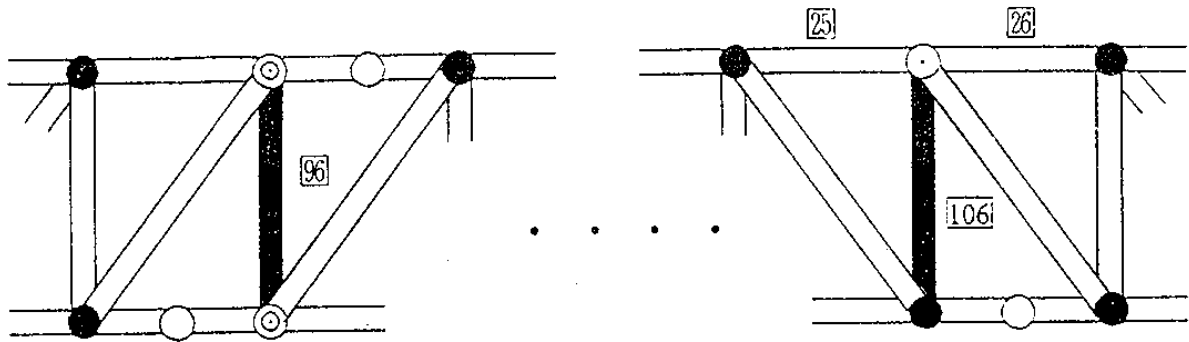
(그림 5-2) 연속트러스의 절점과 요소



(그림 5-3) 연속트러스의 보요소(BEAM ELEMENT) 모델



(그림 5-4) 연속트러스의 바닥판(PLATE ELEMENT) 모델



● 모든 부재 강결

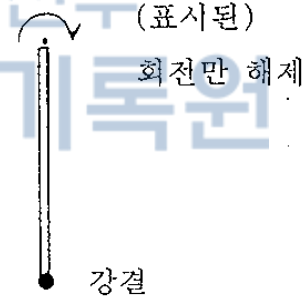
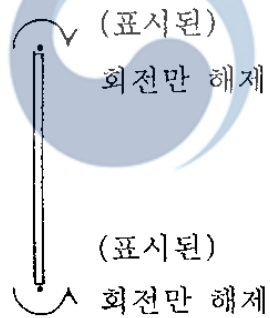
◎ 수직 부재 해제

○ 모든 구속 해제

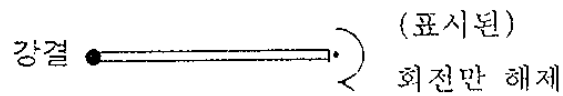
○ 모든 연결 부재 회전 해제

• HANGER 96.428

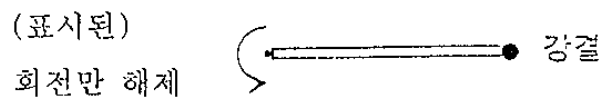
• HANGER 106.438



부재 : 25



부재 : 26



(그림 5-5) 절점의 구속조건

5-3-2 구조 해석 모델

해석모델링시의 특징은 다음과 같다.

- ① 5경간 연속트러스 중에서 독립으로 구조모델링이 가능한 구간만을 3차원 연속 트러스 구조로 모델링하였다(그림5-1, 그림5-2, 그림 5-3). 즉, 붕괴구간 주위의 1개 현수트러스(Suspended Truss) 부분과 양측 2개의 고정 트러스(Anchor Truss) 부분을 모델링하였다. 이때 양측 고정트러스(Anchor Truss) 단부에는 해당경간의 현수 트러스(Suspended Truss)에 의한 사하중을 포함시켰다.
- ② 바닥판(Slab)은 평판요소(Plate Element)로 모델링한다(그림 5-4).
- ③ 바닥판은 반합성으로 가정하여 작용사하중은 트러스 부재가 모두 부담하고 사용하중에 대하여는 바닥판과 트러스 부재가 같이 부담하는 것으로 모델링한다. 단, 사하중하에서는 바닥판의 탄성계수를 아주 작게($E=0$) 고려함으로써 실제 구조계에 가까운 모델을 사용하여 하중조합을 실행하였다.
- ④ 트러스부재들과 가로보(Cross Beam), 세로보(Stringer), 횡브레이싱(Lateral Bracing), 대각브레이싱(Diagonal Bracing)은 모두 보요소(Beam Element)로 모델링하였다. 그러나 부재의 응력을 산정할 때에는 계산시 구한 모멘트의 50%만을 고려한다(설계시에도 동일함).
- ⑤ 가로보와 세로보를 3차원으로 모델링하여 바닥판에 작용하는 윤하중이 3개의 주트러스로 하중분배되는 현상을 정확히 모델링할 수 있도록 하였다.
- ⑥ 수직재 양단의 편연결부 절점의 구속조건은 (그림 5-5)와 같다.

5-3-3 구조 해석 하중

가. 단위하중 산정 (그림 5-6)

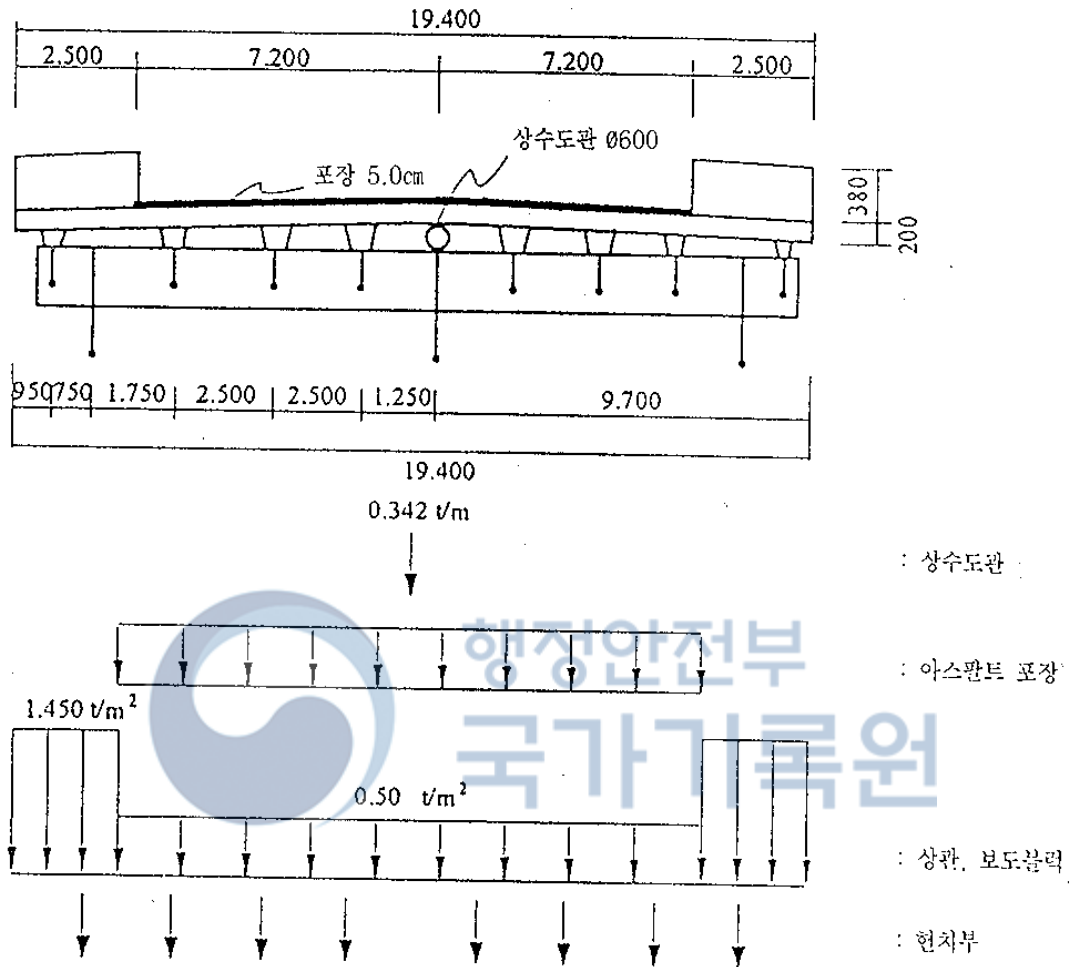
- 포장 : $0.050 \times 2.30 = 0.115\text{t/m}^2$
- 차도슬라브 : $0.2 \times 2.5 = 0.50\text{t/m}^2$
- 보도슬라브, 보도블럭 : $(0.2 + 0.38) \times 2.5 = 1.45\text{t/m}^2$
- 현 치 부 : 집중하중으로 고려

나. 하중분배 (그림 5-7)

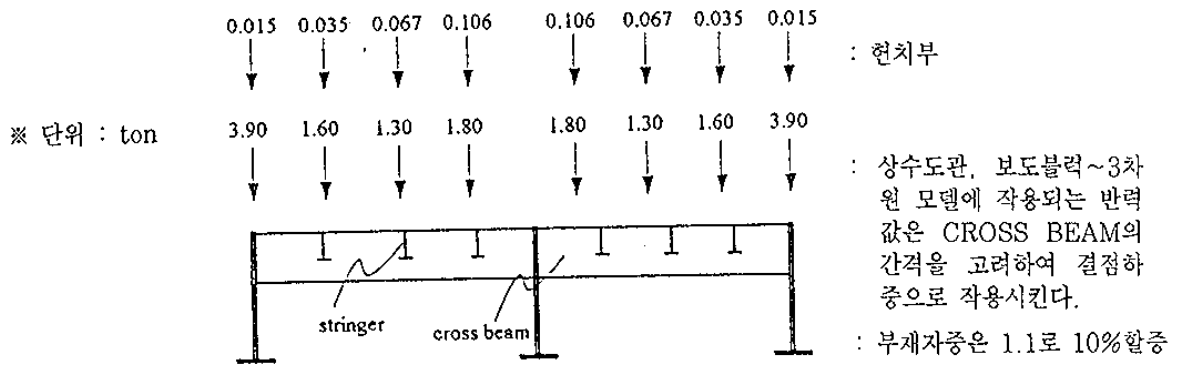
- ① 가로보를 세로보 위치에 지점을 갖는 연속보로 모델링하여 반력을 계산하여 하중분배치로 고려한다.
- ② 활하중 (차량하중)
 - DL-18 하중 (설계시와 동일)
- ③ 풍하중 (표5-1 참조)

(표 5-1) 판형교 또는 2주구 트러스 이외의 교량부재에 작용하는 풍하중(kg/m')

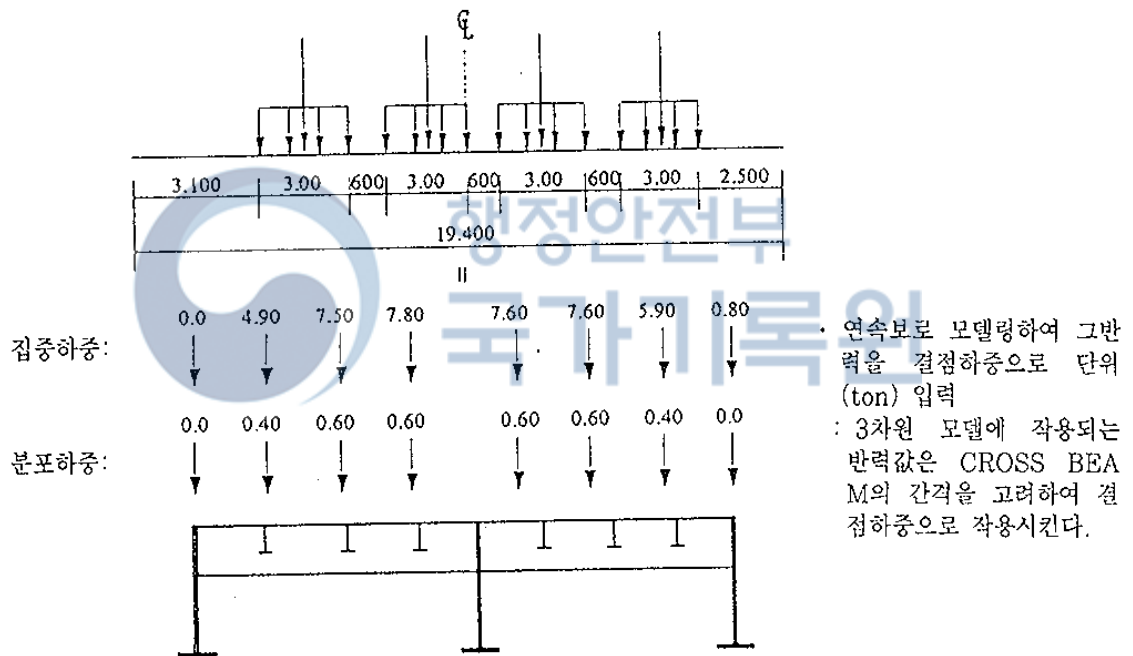
부재의 단면형상		풍 하 중	
		풍 상 측 부 재	풍 하 측 부 재
원 형	활하중 재하시	75	75
	활하중 비재하시	150	100
각 형	활하중 재하시	150	75
	활하중 비재하시	300	150



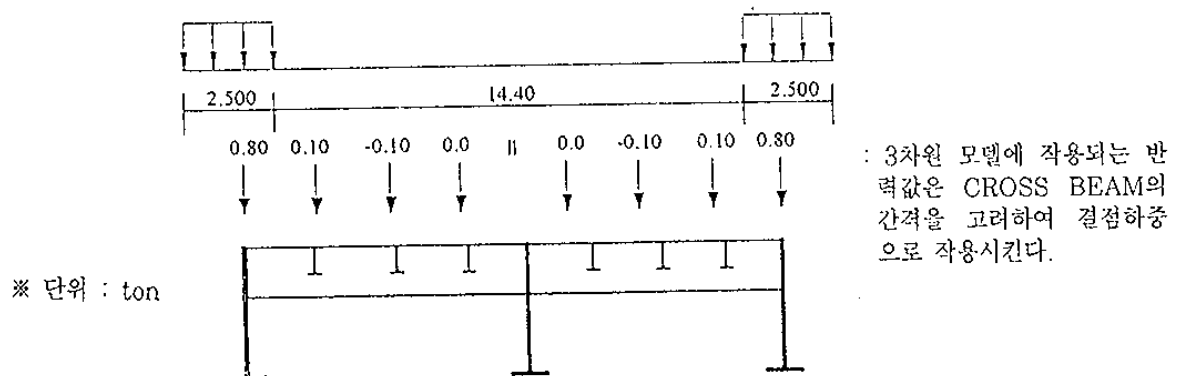
(그림 5-6) 단위하중의 산정



○ 활하중(4차선 재하)



○ 보도하중



(그림 5-7) 연속보해석모델에 의한 횡하중분배

다. 하중조합

① 단위하중일 경우

종 류	하 중 의 조 합
CASE 1	DEAD LOAD 1 + DEAD LOAD 2
CASE 2	LIVE LOAD (2 LANE)
CASE 3	LIVE LOAD (3 LANE)
CASE 4	LIVE LOAD (4 LANE)
CASE 5	WIND LOAD (FULL)
CASE 6	WIND LOAD (1/2)

② 조합하중일 경우

종 류	하 중 의 조 합
CASE 7	DEAD LOAD 1, 2 + LIVE LOAD (2 LANE)
CASE 8	DEAD LOAD 1, 2 + LIVE LOAD (3 LANE)
CASE 9	DEAD LOAD 1, 2 + LIVE LOAD (4 LANE)
CASE 10	DEAD LOAD 1, 2 + LIVE LOAD (2 LANE) + WIND ($\frac{1}{2}$)
CASE 11	DEAD LOAD 1, 2 + LIVE LOAD (3 LANE) + WIND ($\frac{1}{2}$)
CASE 12	DEAD LOAD 1, 2 + LIVE LOAD (4 LANE) + WIND ($\frac{1}{2}$)
CASE 13	DEAD LOAD 1, 2 + WIND (FULL)

라. 강교의 설계시에 하중조합 및 증가계수

경우	하 중 조 합	증 가 계 수
1	주하중 + 주하중에 해당하는 특수하중 + 온도변화의 영향	1.15
2	주하중 + 주하중에 해당하는 특수하중 + 풍하중	1.25
3	주하중 + 주하중에 해당하는 특수하중 + 온도변화의 영향 + 풍하중	1.35
4	주하중 + 주하중에 해당하는 특수하중 + 풍하중 + 제동하중	1.25
5	주하중 + 주하중에 해당하는 특수하중 + 충돌하중	1.70
6	풍하중만 고려할 때	1.20
7	제동하중만 고려할 때	1.20
8	활하중 및 충격 이외의 주하중 + 지진의 영향	1.50
9	가설시 하중	1.25

5-3-4 구조해석 결과

가. 수직재

해석결과 수직재에 발생하는 인장력은 다음과 같다.

모 델 링	최 대 인 장 력 (TON)		
	DEAD LOAD	LIVE LOAD	합
SLAB 모델	166.3	57.35	223.7
BEAM 모델	166.3	58.55	224.9

또한, 수직재에 작용하는 최대응력은 다음과 같다.

모 델 링	최 대 인 장 응 력 (kg/cm ²)		비 고
	CASE 12	CASE 13	
SLAB 모델	1237.9	1181.9	SLAB모델은 바닥판을 평판요소로 모델링함
BEAM 모델	1276.9	1242.3	
허 용 응 력	1750.0	1680.0	할증량 도입

※ CASE 12 : DEAD LOAD + LIVE LOAD + WIND LOAD (1/2) ~ 허용응력 할증 1.25

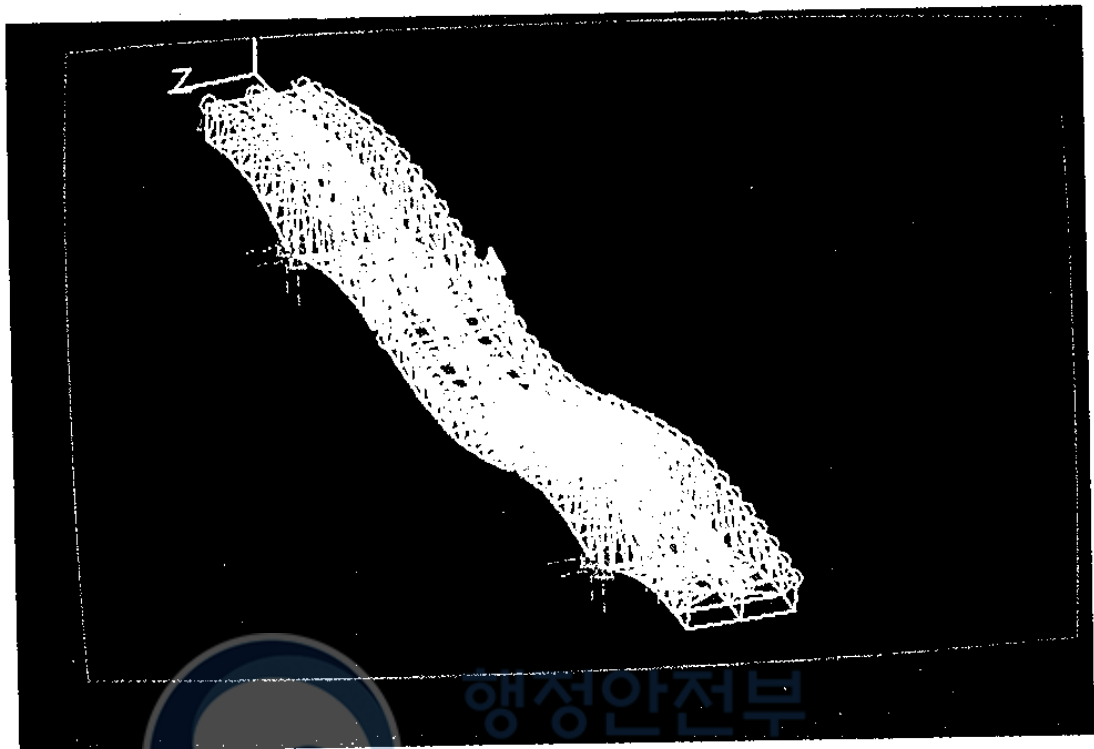
CASE 13 : DEAD LOAD + WIND LOAD (FULL) ~ 허용응력 할증 1.20

나. 가로보 (CROSS BEAM)

설계시 응력	검토시 응력	비 고
1043 kg/cm ²	505 kg/cm ²	허용응력 1196kg/cm ² 보다 작음

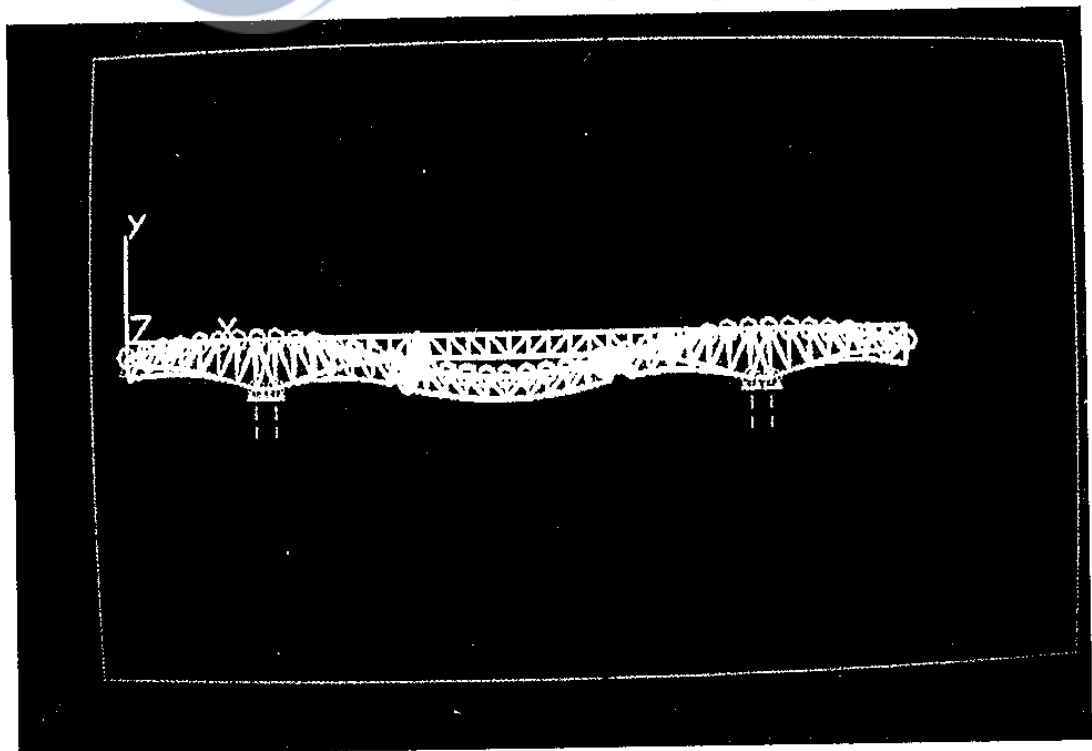
다. 횡브레이싱 (LATERAL BRACING)

설계시 응력	검토시 응력	비 고
283.94 kg/cm ²	577 kg/cm ²	허용응력 843.79 kg/cm ² 보다 작음



행정안전부

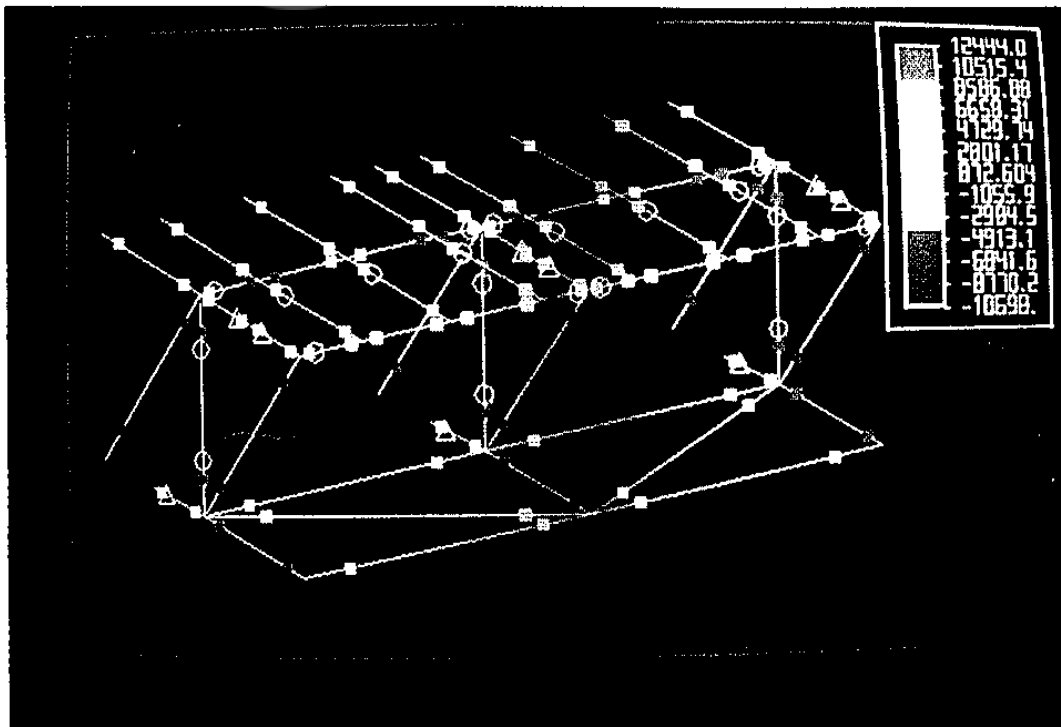
국가기록원



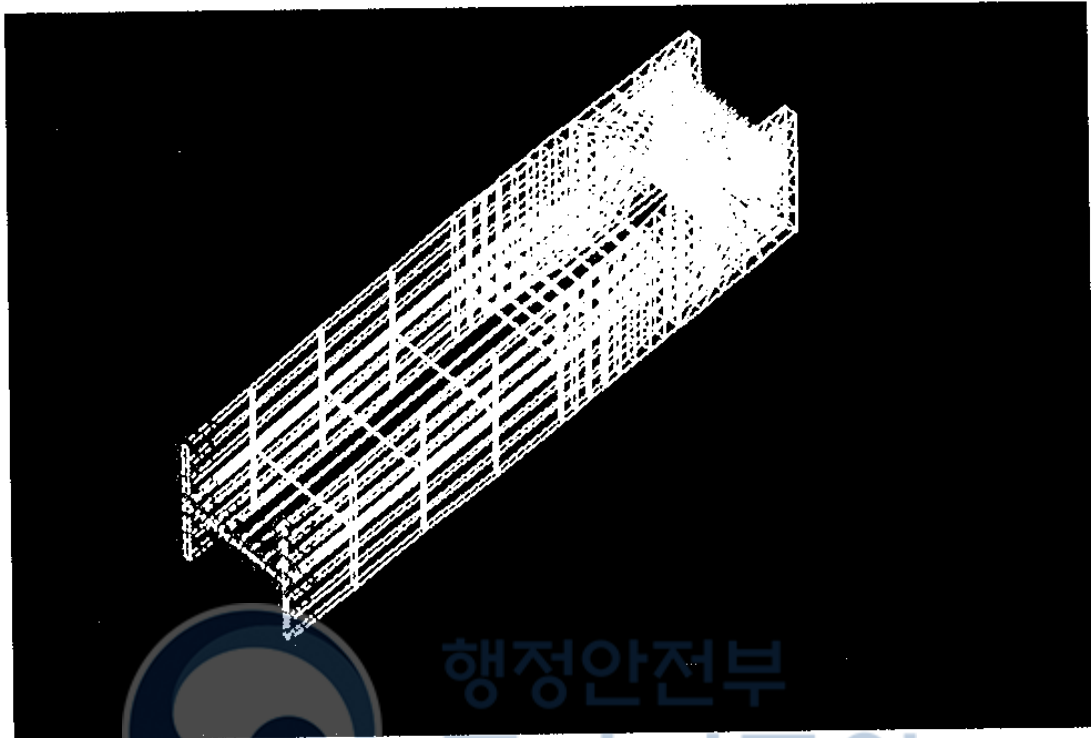
(그림 5-8) CASE12에서의 처짐



(그림 5-9) CASE12에서의 바닥판 응력도

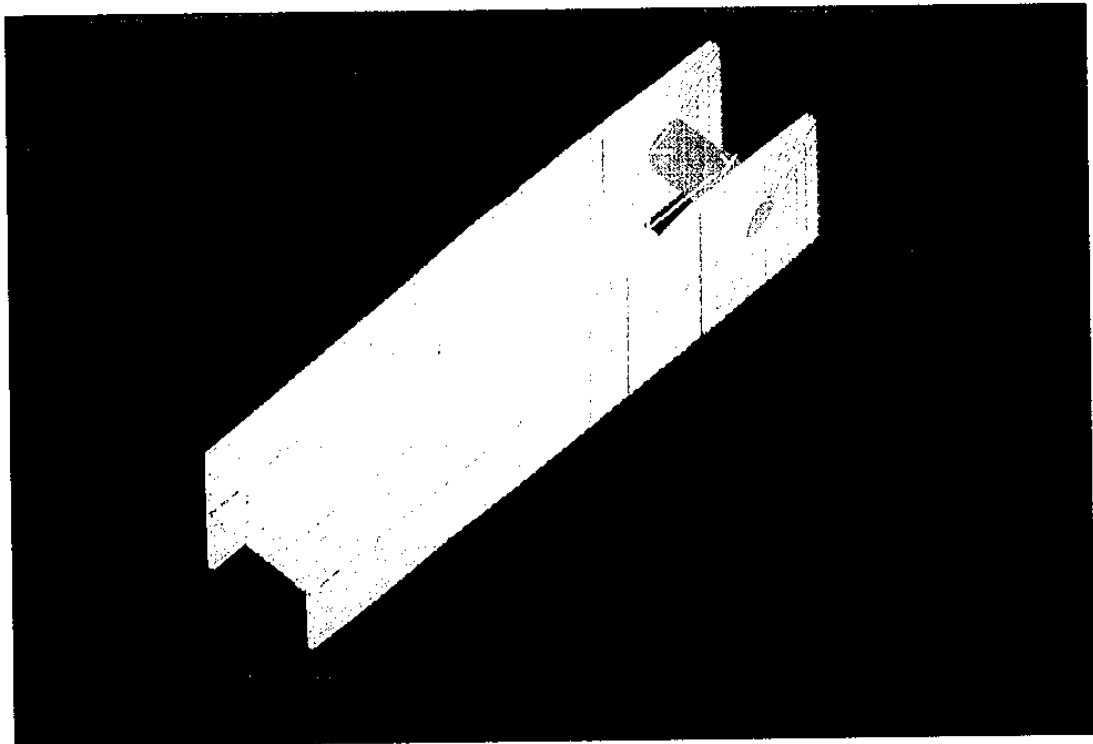


(그림 5-10) CASE12에서의 편연결부위의 부재응력도

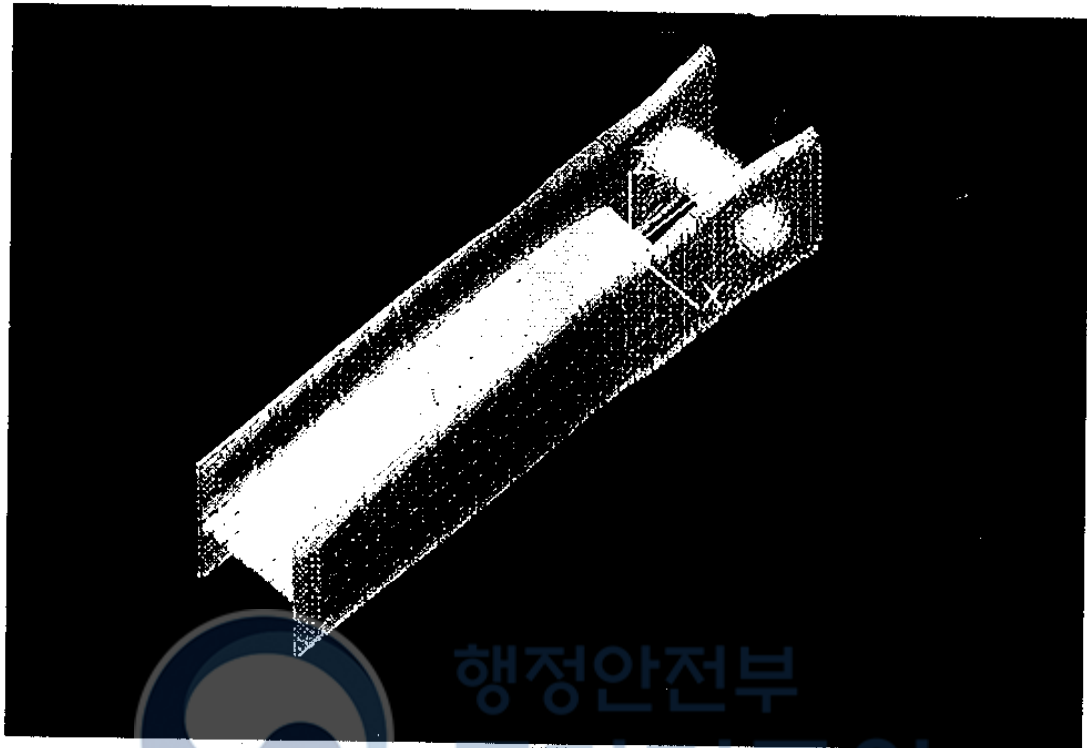


행정안전부

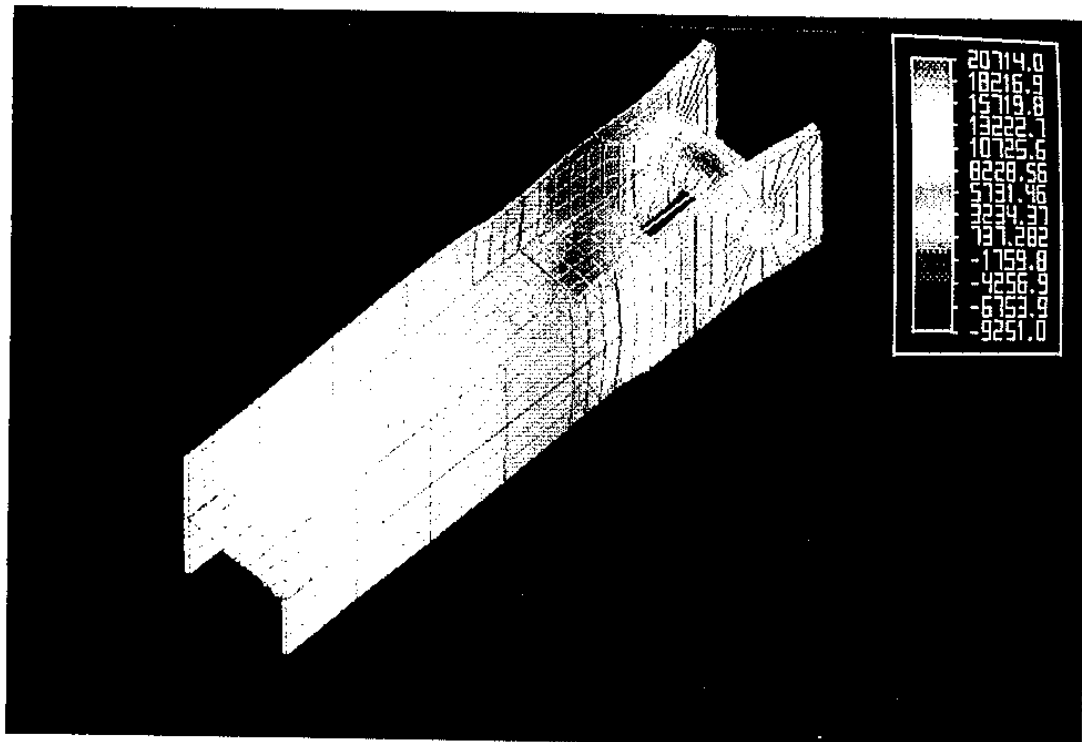
국가기록원



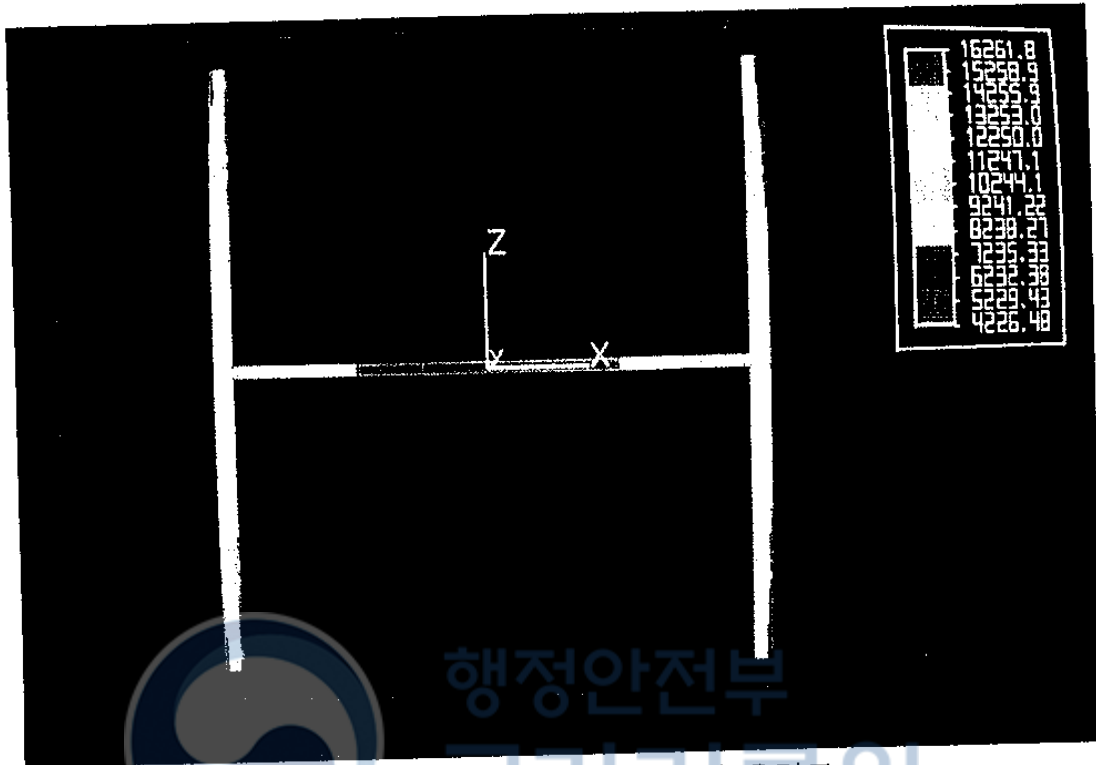
(그림 5-11) 수직재의 해석모델



(그림 5-12) 수직재의 변형도



(그림 5-13) 수직재의 응력도



(그림 5-14) 수직재 용접부의 응력도

5-3-5 설계 내용 검토

- 가) 수직재의 핀 연결부의 플랜지 두께 변화부의 위치(용접부)가 Gusset Plate내에 있어 잘 보이지 않고 제작 및 유지관리에 불편하다.
- 나) 핀이 가로보 사이에 있어 검사 및 보수에 불편하다.
- 다) 브레이싱재의 단면이 계산상 별문제는 없으나 강성을 크게 하기 위하여는 다소 적은 듯하다.
- 라) 힌지부의 수직 브레이싱이 다소 약하다.
- 마) 가로보(Cross Beam), 세로보(Stringer)의 연결이 구조계산상 단순 지지이나 실구조물은 마찰접합(고장력 볼트)으로 인하여 연결부에 결함이 초래될 가능성이 있다.

5-4 분석 및 고찰

5-4-1 구조계산

설계 당시는 전산기가 보급되지 않아 일반적으로 평면 계산에 의한 설계를 하였던 바, 이번 검토에서는 전산에 의한 3차원으로 원설계가 계산상 안전한지 여부를 검토한 바, 각 부재의 응력이 계산상 허용응력을 초과한 경우는 없었다.

5-4-2 설계내용

설계당시 유사한 구조물이 없었을 뿐만 아니라 최초의 용접 트러스교인 점 즉, 경험 부족과 설계 기간이 턱없이 부족했던 여건은 인정되나, 설계상 다소의 문제점은 있으며 향후 본 구조물을 보강해서 사용하기 위하여는 상당 부분의 개선이 필요하나 주트러스의 파괴 원인을 설계에서는 찾아볼 수 없다. 그러나 수직재의 용접 위치가 거세트판 안쪽에 위치하여 시공곤란 및 유지관리상 점검 및 보수에 불편하게 설계된 점, 가로보의 위치가 수직재 현지 보수를 불가능하게 한 점, 가로보와 세로보의 연결방법(고장력볼트 연결)이 구조계산과 다르게 작용하여 연결부에 2차응력이 다소 크게 작용하여 결함이 계속 발생할 수 있는 점, 브레싱 단면이 적어(응력상은 충분) 강성이 약하고 진동에 약한 점 등은 아쉬움으로 남는다.

6. 시공 내용 감정

6-1 개 요

본 교량의 시공 순서를 보면, 설계 도면을 재검토하여 제작, 가설 및 구조상 문제가 있는지 여부를 검토하고, 제작도를 작성하며, 자재 명세서를 작성하여 자재를 주문한 후, 제작 및 작업 순서 유의사항 등을 명기한 상세 제작 명세서(시방서)를 작성하여, 실물 크기의 본뜨기, 절단, 정리, 용접작업 후, 한경간 전체(주구조, 가로보, 세로보까지)를 완성, 가조립을 실시한 후에, 최종보정과 정리를 하게 된다.

주구조를 운반 가설 후 가로보, 세로보를 설치하고 상판 콘크리트 가설로 구조물이 완성되나, 제작과정에서 용접의 검사와 체결볼트의 검사가 중요하다. 용접검사는 주로 비파괴 검사로 방사성 검사와 초음파 검사가 일반적이거나, 당시는 방사선 검사가 유일한 검사방법이었으며 관련 장비 및 기술자 등도 충분하지 않은 상태였다.

6-2 시공 자료 검토

6-2-1 재 료

본 교량에 사용된 용접용 강재는 포항 제철에서 용접 강재를 생산하기 시작한 초기 자재로서, 재료 시험 결과 문제점이 발견되지 않았으며 재료의 품질은 합격품을 사용한 것으로 추정된다.

6-2-2 설계도 검토 및 제작도 작성

강구조물 건설의 가장 주요공정이 설계와 제작도 작성 및 제작과정이다. 그중에서도 구조물의 안전을 최종 점검하고 제작의 순서, 방법 및 실물 본뜨기를 할 수 있도록 하며 제작에 따른 세부 시방 사항 등을 규정하는 설계도 검토와 제작상세도 작성은 강구조물 시공의 핵심이다. 그러나 그 당시 기술수준이 시공도를 정확히 작성하기엔 미흡할 뿐 아니라 양성된 기술자도 부족하여 일반적으로 국내 구조물은 제작도 없이 설계도와 본뜨기가 조립에 의존하여 제작되었다. 따라서 본 교량의 공사기록 즉, 공사 보고서와 교량의 연결부 등을 종합 검토한 바에 따르면, 설계도 검토과정, 제작도 승인과정과 제작도가 없을 뿐 아니라, 교량대장은 제작도가 기준이 되어 반영하게 되어 있으나 실제 교량대장은 설계도를 그대로 복원하여 실구조물과 틀리는 부분이 여러곳에서 발견되었다.(예. 수평 브레이싱 등)

따라서 본 교량은 제작도 없이 설계도에 의하여 제작된 것으로 보이며, 제작도 작성으로 수정·보완될 부분이 그대로 시공되어 아쉬움은 남기고 있으나, 당시 기술수준으로는 다소 무리일 뿐 아니라 공기가 짧아 제작도 작성과 승인과정을 거칠 여유가 없었던것으로 판단된다.

6-3 용접 시공 검토

6-3-1 파단된 수직재의 관찰내용

1) 강북 중앙부 수직재 파단면

- (1) 파단면 내부는 완전용접이 되어있지 않고 모재절단가공면 그대로이며, 가스절단에 의해 발생하는 Notch가 그대로 보이고 있음.
- (2) Gusset Plate와 접촉되는 면의 용접은 수동용접으로 1층만 용접을 수행하고 용접여성은 Grinding 한 것으로 사료되며, 대표적인 1개소에 대하여 용입깊이를 계측한 결과 4.1mm 정도로 나타남. 또한 용접형상

으로 볼 때 완전 용착된 형상이라기 보다는 Root Gap이 크에 따른 홀려내림의 현상으로 사료되는 부분이 있음.

- (3) 복부판측의 플랜지용접부를 검토한 결과 파단면이 비교적 매끄럽고 45° 각도로 파단된 형상으로 미뤄 전형적인 피로파괴의 형상이 나타남. 용접은 수동용접으로 1~2층 용접을 수행한 것으로 사료되며, 대표적인 1개소에 대하여 용입깊이를 측정한 결과 5.08mm 정도로 나타남.

2) 강북 서쪽 수직재

- (1) 대체적인 파단면의 상태 및 용접상태는 1)절과 동일함.
- (2) 파단면 내부에 최초 모재가공시의 가스절단에 의한 Notch가 심하게 나타나 있음.
- (3) 복부판측 플랜지 용접부를 자세히 관찰한 결과 수직재의 표면측에 약간 개선 가공된 것을 확인

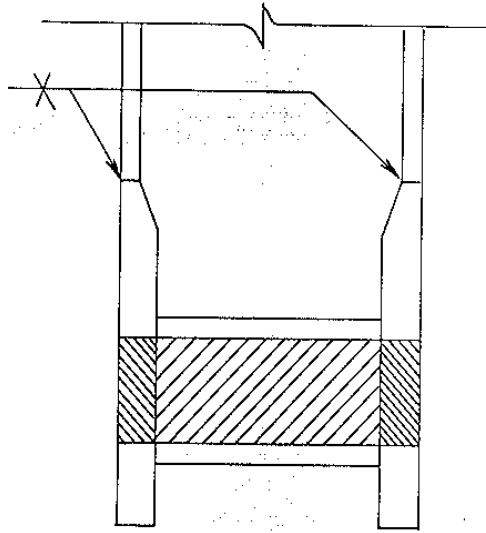
3) 강남쪽 수직재

- (1) 대체적인 파단면의 상태 및 용접상태는 1)절과 동일함.
- (2) 피로파괴가 발생한 것은 아니며, 강북쪽 수직재가 파단됨에 따라 강제적으로 뜯겨진 형상임.
- (3) 용접부에 결함(주로 기공)이 다수 발견됨.

6-3-2 시공내용의 검토 및 분석

1) 일 반

용접은 정확, 정중히 하여야 하며, 용접에 의한 수축 또는 비틀림이 가급적 적도록 하여야 한다. 또한 용접방법은 설계도와 같아야 한다고 규정되어 있다. 수직재의 경우 설계도면상에는 (그림 6-1)과 같이 표시되어 있는 바, 이는 모재에 대하여 X모양으로 개선가공을 하고 완전용접이 되도록 요구하고 있는 것으로 해석된다.



(그림 6-1) 설계도면상의 수직재에 대한 용접표기

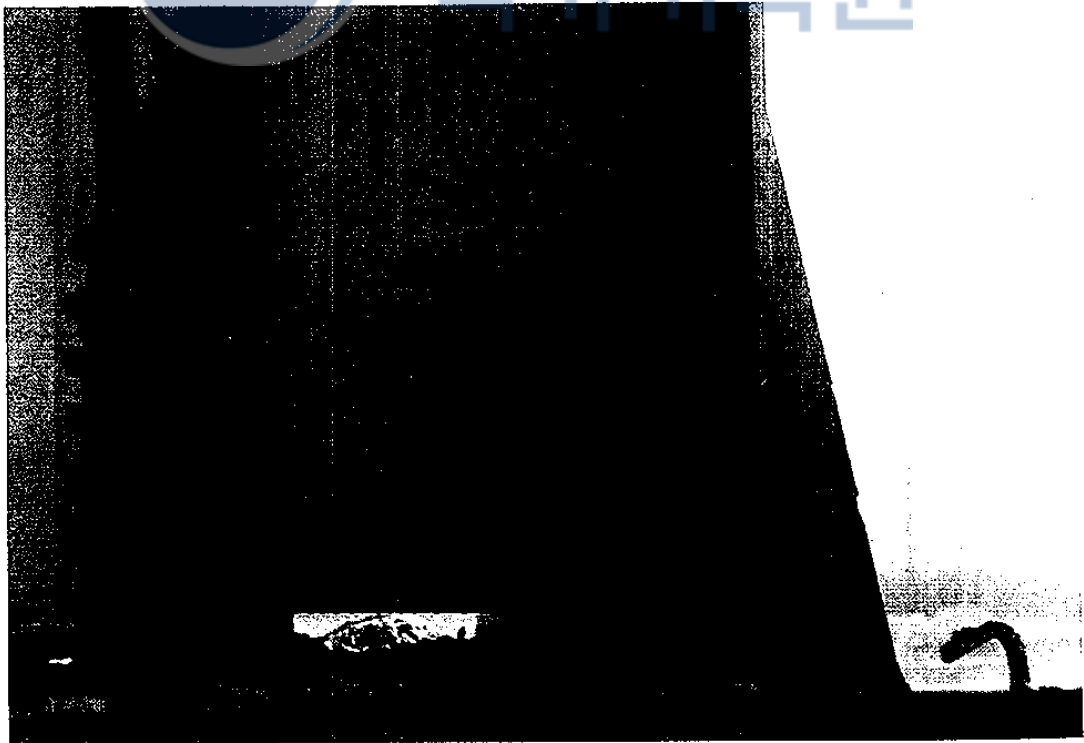
그러나 붕괴된 수직재의 파단면을 관찰한 결과로는 다음 <사진 6-1>에 나타낸 바와 같이 X모양으로 개선가공을 하지않고 모재를 절단한 그 상태로 용접한 사실이 인정된다. 즉, 특별시방서에서 요구한 개선시공없이 바로 용접을 수행함으로써 완전용접이 처음부터 불가능하게 되어 있으며, 이는 명백한 특별시방서 요건의 위반사항이라고 할 수 있다.



<사진 6-1> 수직재 파단면

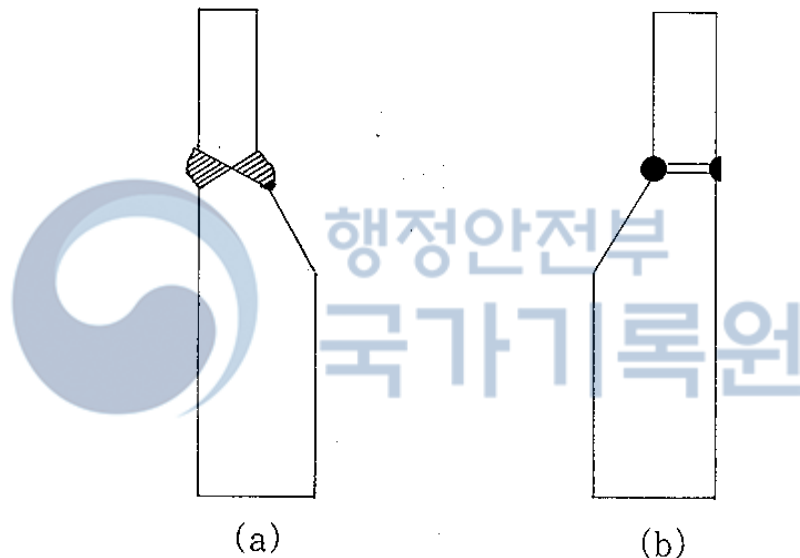


〈사진 6-2〉 수직재 파단면



〈사진 6-3〉 파단면과 유사한 수직재 균열상태

(그림 6-2)에 X 개선시공에 의한 완전용접모양(a)과 개선시공을 하지 않은 현재의 불완전용접의 모양(b)을 비교하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 완전용접이 되지 못한 경우 용접부의 유효 단면적의 감소로 인한 강도의 저하가 발생할 뿐 아니라 특히 불완전용접부의 용입부족 자체가 균열의 시작점으로 작용함으로써 파괴인성치의 저하에 따른 피로균열의 발생 가능성을 크게 한다.



(그림 6-2) X 개선시공에 의한 완전용접모양(a)과
개선시공을 하지않은 현재의 불완전
용접의 모양(b)

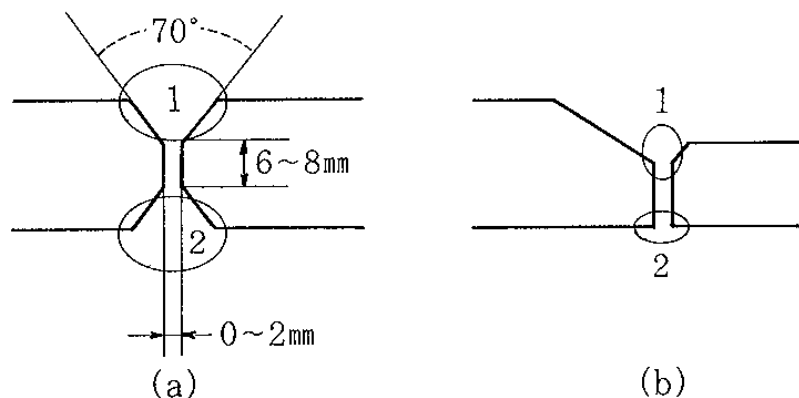
이와 관련하여 한 가지 더 짚고 넘어가야 할 사항은 설계도면에서의 X 개선의 표시는 S-Truss(1) 도면의 수직재 하부에만 표기되어 있다는 사실이다. 다만, 수직재의 개선가공이 하부만 X 개선이고 나머지는 마음대로 해도 된다는 것은 아니고, 특히 특별시방서에 맞대기용접에 대하여는 완전용접이 되도록 요구하고 있으므로 당연히 모재에 대하여 X개선을 하는것이 정상적인 것으로 간주될 수 있다.

2) 강 재

품질이 다른 강재를 사용할시는 각각의 강재가 명료하게 구별되도록 하여야 한다고 규정되어 있다. 이는 강재의 사용이 잘못되는 것을 방지하기 위하여 현행의 도로교 표준시방서에서 규정한 Colour Coding 을 하거나, 강재의 Heat No. 또는 Plate No. 등의 강재식별번호를 관리할 것을 요구한 것으로 사료되나, 당시의 기록이 없기 때문에 확인이 곤란한 사항이다. 다만 수직재의 경우 KS D3515(용접구조용 압연강재)에 규정된 SWS400B 강재로서 고장력강이 아닌 연강이기 때문에 강재의 잘못된 사용에 대한 우려가 없으며, 파단된 수직재에 대한 화학성분 분석, 인장시험 및 충격시험등 재료시험을 실시한 결과 수직재의 재료가 SWS400B로 밝혀졌으므로 강재의 사용에 대한 문제점은 없는 것으로 사료된다.

3) 개선의 가공

개선은 설계도에 의해 형상을 정확히 가공하고 그 면을 가급적 평활하게 하여야한다. 그러나 당시의 실제공사에 적용되었을 제작도면의 입수가 불가능 하였으므로 (그림 6-3)에 통상의 개선가공 형상조건(a)과 수직재의 파단면을 관찰한 결과(b)를 비교하여 나타내었다.(그림 6-3)의 (a)는 ESAB Welding Handbook 제3판에서 인용한 것이다.



(그림 6-3) 통상의 개선가공형상(a)과 수직재의 개선가공형상(b)의 비교

또한 앞의L <사진 6-1>에도 뚜렷이 나타나 있는 바와 같이 수직재의 파단면을 검토한 결과 개선가공이 거의 되어있지 않을 뿐 아니라 모재의 가스절단면에 노치가 많이 발생되어 있는 점을 감안할 때, 실제 시공조건은 특별시방서의 규정과는 달리 개선가공도 되어있지 않고 절단면의 노치에 대한 조치도 전혀 이루어지지 않는등 특별시방서의 조건을 전혀 만족시키고 있지 않음을 알 수 있다. 이러한 개선가공조건의 불만족은 바로 용접결함을 유발한 근본적인 원인으로 지적할 수 있다.

4) 용접공

용접공은 JIS Z3801(용접기술검정의 시험방법 및 그 판정기준)에 정하여진 시험종류중 그 작업에 해당하는 시험에 합격한 자이어야 하며, 6개월이상 용접공사에 종사한 자이어야 하고, 공사전 2개월이상 계속 그 공장에서 용접공사에 종사한 자로 규정하고 있다. 즉, 본 공사의 용접을 수행하는 용접공은 해당 용접을 충분히 수행할 수 있는 기량과 숙련도를 가지고 있음이 확인되어야 하며, 이러한 확인절차로서 제작자는 그 공사에 종사한 용접공의 명부를 제출하여 감독자의 승인을 받도록 규정되어 있다.

따라서 이러한 확인 및 승인을 위해서는 본 공사의 용접에 종사할 용접공에 대하여 사전에 JIS Z3801에 따라 시험을 실시하고, 결과를 판정하거나, 제출된 용접공 기량자격관련 자료의 내용을 검토하여 기량을 검증하는 절차가 당연히 수행되어야 하며, 그러한 절차는 감독자의 입회 또는 책임하에 수행되어야 할 것이고 또한 감독자만이 용접공의 승인에 관한 최종적인 권한을 가지게 된다. 다만, 수직재의 경우 공장에서 하향 용접자세로 용접이 수행되었을 가능성이 큼을 감안할 때, 용접공의 기량 미숙으로 인한 문제점은 없을 것으로 사료된다.

용접공과 관련하여 한가지 더 고려되어야 할 점은 수직재와 같이 중요한 부재의 용접이 완전용입이 되지 않았음은 완전용입에 대한 지시가 용접공에게 주어지지 않았던지 아니면, 용접공이 고의로 무시하였던지 2가지 중의 한가지이나, 통상 용접공의 경우 사전에 용접개선이 된 상태에서 용접만 수행할 뿐 용접개선의 시공에 대한 책임이 없으며, 용접개선은 가스절단에 의해 별도의 기능공이 별도의 장소에서 작업함을 감안할 때, 수직재의 용접불량에 대하여 용접공의 책임을 묻기에는 무리가 따를 것으로 사료된다.

5) 용접법 및 용접재료

도면상에는 수직재의 용접에 대하여 자동용접을 적용토록 규정되어 있으며, 특별시방서의 제 21조에는 자동용접조건에 대하여 상세히 규정되어 있다. 특히 용접개선면의 루우트 갭은 1mm를 넘지않도록 규제하고 있다. 그러나 실제 수직재의 용접은 피복아아크용접봉에 의한 수동용접으로 수행되었으며, 초음파탐상시험으로 전체의 수직재에 대하여 조사한 결과 루우트 갭 또한 0mm ~ 7mm 사이로 특별시방의 요건을 만족시키지 못하고 있음이 확인되었다. 다만, 수직재 플랜지부의 용접길이(플랜지의 나비)가 500mm로서 자동 용접을 적용하기엔 용접길이가 짧아 도면에 기재된 요구사항을 만족시키는 것이 현실적으로 어려움이 있는 것은 충분히 인정된다.

수동용접의 경우, 용접봉에 대하여는 특별히 어떠한 용접봉을 사용하라는 규정은 특별시방서에 규정되어 있지 않으나, 다만 강재의 성질에 적합하고 지름이 4~6mm인 용접봉을 사용하도록 규정하고 있다. 또한 시공당시자료에 의하면 KS E4316 이나 KS E4303의 용접재료를 사용한 것으로 알려져 있다. 다음 (표 6-1)은 KS E4316 과 KS E4303의 기계적성질, 화학성분 및 사용용도 등을 비교한 것이다.

(표 6-1) KS E4316 및 KS E4303 용접재료의 화학.기계적성질 및 용도 비교표

구 분	화 학 성 분(%)					기계적 성질				용 도	비 고
	C	Mn	Si	P	S	항복점 (kg/mm ²)	인장강도 (kg/mm ²)	연신율 (%)	충격치 (kg-m)		
K S E4316	0.08	0.96	0.45	0.012	0.009	48	56	33	16	선박, 교량, 기계등의주 요강도부재, 후판구조물, 압력용기.	저수소 계용접 봉
K S E4303	0.08	0.36	0.15	0.013	0.013	42	46	32	12	선박, 차량, 기계, 건축, 교량 등의 용접	라임티 타니아 계용접봉

표에서 보듯이 연강인 수직재의 용접에는 어떠한 용접재료를 사용하여도 별 무리가 없는 것으로 사료되며, 다만, KS E4316을 사용한 경우 기계적성질이 좀 더 양호하며, 저온에서의 파괴인성이나 피로강도에서 좀 더 나은 결과를 보여줄 수 있을 것으로 사료된다.

이와 관련하여 파단된 수직재의 용접부에서 Chip을 만들어 화학성분 분석을 한 결과 저수소계 용접봉을 사용하였을 가능성이 많음을 확인하였으며, 또한 용접비이드 형상으로 볼때 지름이 4-6mm인 용접봉을 사용한 것으로 인정된다. 다만, 통상적인 강도 부재의 용접시 지름이 2-4mm인 용접봉을 사용 하는 것이 일반적임을 감안할 때, 4-6mm용접봉의 사용을 표준화한 규정은 재검토할 필요가 있는 것으로 사료된다.

6) 조 립

용접을 함에 있어서는 조립치수를 적절히 맞추거나 또는 교정구(판붙임)등에 의하여 모재의 상호 위치를 정확히 맞추어야 하며, 맞대기 용접이음에 있어서는 개선의 루우트 간격을 정확히 유지하도록 주의하고 큰 오차가 생기지 않도록 하여야 하며, 모따기 용접에 있어서는 모재의 상

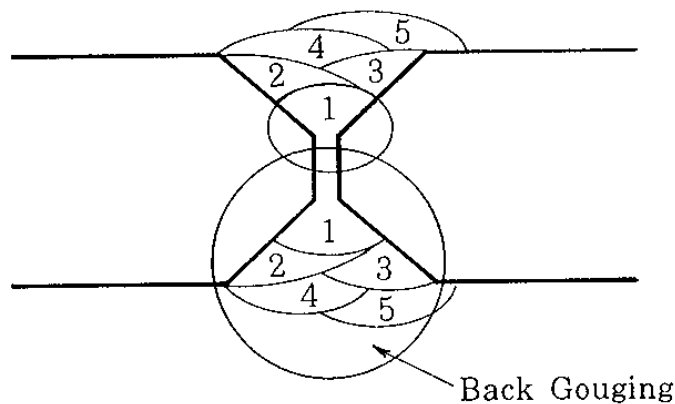
호 밀착에 주의하고 심한 공극이 없도록 주의하도록 규정하고 있다.

이러한 조립치수의 정확성을 기하기 위해서는 용접전에 Fit-up 검사를 수행하여 개선형상의 정확성과, 루우트 간격 및 부재 상호간의 직선도등에 대하여 확인이 되어야한다. 전 6-3-3에서도 지적하였듯이 개선가공이 전혀 이루어지지 않았음을 고려할 때, 이러한 용접전의 조립치수의 정확성에 대한 검사는 전혀 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

이러한 검사를 누가 수행하여야 하느냐에 대한 책임문제를 거론하기 이전에 이러한 검사는 품질관리활동에 있어서 가장 기본적인 사항이며, 이러한 검사가 제대로 이루어졌다면 하는 아쉬움이 남는다.

7) 용접순서 및 용접자세

용접순서는 용접구조에 충분한 지식과 경험을 가진 기술자가 결정하고 감독자의 승인을 받아야 하며, 용접은 원칙적으로 하향용접을 하도록 규정되어 있다. 용접순서는 용접에 의한 수축 또는 비틀림등 변형을 방지하는 수단으로 용접에 있어서 상당히 중요한 부분이다. 참고로 (그림 6-4)에 X 개선의 경우의 통상적인 용접순서의 예를 나타내었다.

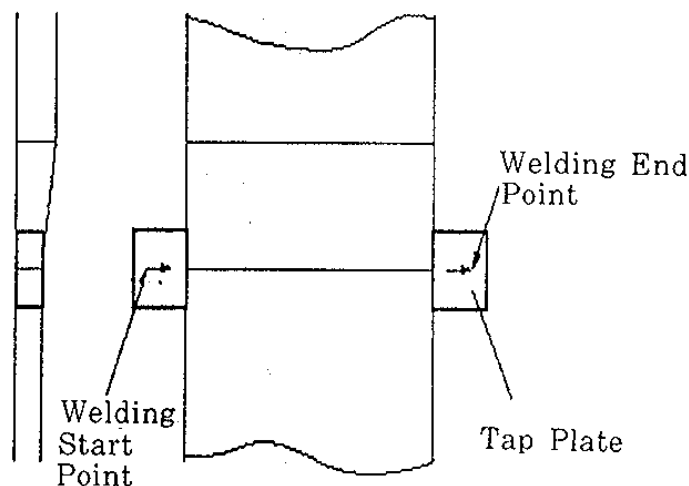


(그림 6-4) X 개선의 경우의 통상적인 용접순서
(사용용접방법에 따라 용접 총수는 변경될 수 있음)

수직재의 경우, 공장제작이 된 점과 실제 용접비이드 형상등을 감안할 때, 용접자세는 하향용접자세로 용접한 사실이 충분히 인정될 수 있을 것으로 사료된다. 다만, 용접순서와 관련하여 근본적으로 용접이 제대로 수행되지 않았기 때문에 용접순서를 따지는 것은 아무런 의미가 없는 것으로 사료된다.

8) 맞대기 용접

맞대기 용접에 있어서는 (그림 6-2)의 (a)에 도시한 바와 같이 표면측의 용접과 이면측에서의 용접이 중합되도록 완전 용입이 되어야 하며, 뒷담판을 써서 맞대기 용접을 하는 경우에는 제 1층(초층)의 용접을 충분히 하고 균열 및 슬래그 혼입등에 특히 주의해야 한다. 중요한 맞대기 용접부의 양단에는 다음 (그림 6-5)에 도시한 예와 같이 Tap Plate 를 가붙임 하고 Tap Plate 에서부터 용접을 시행하여야 하며, 용접완료 후 Tap Plate를 제거하고 용접단부를 끝손질 하여야 한다. 또한 각 층의 표면은 다음층을 용접하기 전에 Slag 등의 용접장애 요인을 완전 제거 하여야 한다.



(그림 6-5) Tap Plate의 가붙임

본 특별시방조건을 감안할 때, 수직재의 용접이 완전용입이 되어야 한다는 사실에는 이견이 있을 수 없다. 특히 각 용접층마다 슬래그등의 용접장애 요인을 완전히 제거하도록 요구한 조건이 완벽히 시행되고, 검사되었다면 사전에 용입불량에 의한 용접불량은 미연에 방지가 가능하였을 것으로 사료된다.

9) 용접조건

SWS400B의 경우 두께가 32mm 이상인 경우 예열을 하도록 규정되어 있으며, 기온이나 천후에 따라 용접을 엄격히 관리하도록 규정되어 있다. 이는 용접에 있어서 가장 기본적인 사항으로 이의 이행여부는 저온에서의 인성 및 피로강도에 영향을 미치는 중요한 인자가 될 수 있다. 그러나 이의 시행에 대한 정확한 자료가 없으므로 검토에는 한계가 있는 아쉬움이 있다.

10) 용접부위 방사선 투과시험

용접완료후 주요부분인 맞대기 용접부위에 대하여는 방사선촬영을 하고 감독자의 지시에 따라 합격여부를 판정받아야 하며, 또한 맞대기 용접의 전 연장의 20%만큼 방사선 촬영하는 것을 표준으로 하고 시험결과는 3급 이상이도록 요구하고 있다.

성수대교의 경우 주요 맞대기 용접이음의 용접길이는 총 2,288.52m이며, 그중 수직재의 용접길이는 45m 로 전체의 2%를 점유하고 있다. 방사선 촬영매수는 정확한 위치는 알 수 없지만 1,800매를 촬영한 것으로 되어있으며, 이를 이용하여 방사선촬영된 전 용접길이를 계산해 보면 실제 촬영된 방사선 촬영매수는 특별시방조건인 전 용접길이의 20%의 조건을 만족시키는 것으로 생각된다.

$$1,800\text{매} \times 0.28\text{m} \div 2,288.52\text{ m} = 22.3\%$$

(단, 필름 1매당 시험범위를 280mm 로 간주)

다만, 방사선 촬영이 제대로 수행되었는지에 대하여는 깊은 의문이 남는다. 예로서 수직재에 대하여 본 감정단에서 총 111매의 방사선 촬영을 한 결과 1개소를 제외한 전 부분에서 심한 용입부족이 확인되었으며, 어느 것 하나 합격 판정될 수 없는 상황임에도 불구하고 1,800매의 방사선 촬영결과가 합격처리 되었다는 사실은 이해하기가 어렵다.

특히 수직재의 전 용접길이가 45m로 전체의 용접길이의 2%에 불과하므로 수직재에 대하여는 전혀 방사선 촬영을 하지 않았다는 해석도 있을 수 있으나, 본 성수대교가 Gerber 구조로서 수직재중에서 가장 중요한 힌지수직재를 촬영하지 않았다는 것은 근본적인 문제를 제기할 수 있을 것이다.

이러한 사항의 확인을 위해서는 나머지 상현재 및 하현재에 대하여도 방사선 촬영을 할 필요가 있으나, 시간 및 경비관계로 시행하지 못한 점은 아쉬움으로 남는다.

특히 시험수가 전체 용접이음의 20%라는 규정에 대하여 엄격히 해석해 볼 필요가 있다. 통상적인 경우 방사선 촬영개소는 표준시방의 내용에 따라 제작자가 촬영부위를 사전 결정하고 그에 대하여 감독관의 승인을 받는 절차로 이루어졌을 것이다.

이 경우 20%라는 규정은 전체의 용접품질을 대표할 수 있는 부분과 용접이 불량하게 나올 가능성이 많은 부분 및 구조상 특히 중요한 부분에 배당될 것이다. 또한 방사선 촬영결과는 감독관의 검토를 거쳐게 되어 있으며, 아울러 감독관의 승인서명이 있어야만 할 것이다.

따라서 본 교량이 이상없이 준공처리가 되었다는 사실과 시공 및 준공

관련업무가 차후의 각종 감사과정에서 문제가 없이 통과되었다는 점은 서류상으로는 하자가 없었다는 것으로 해석할 수 있는 반면, 실제 수직재의 상황으로 보아서는 방사선 투과 촬영의 품질에 근본적인 문제가 있었던지 감독관이 비파괴시험에 대해 전혀 문외한이었는지 둘 중에 하나였을 것으로 생각된다. 특히 감독관의 필름검토 전에 시공자측의 사전검토가 있었을텐데도 합격처리된 것은 더욱 더 이해하기 힘든 부분이다.

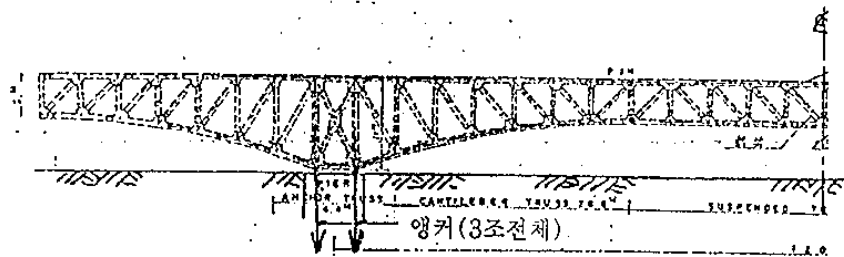
11) 용접부 검사

모든 용접부위는 용접착수전, 용접작업중, 용접작업완료후 감독자의 검사를 받아야 한다고 규정되어 있다. 이는 용접전의 개선편 및 Fit-up(조립) 검사와 용접중의 용접 절차 및 용접완료후 외관검사 및 비파괴 검사에 대하여 감독자의 검사를 받도록 규정한 것으로 해석할 수 있다. 그러나 수직재의 파단면 관찰기록이 보여주듯이 이러한 검사중 어느 하나 제대로 이루어지지 않은 것으로 사료된다. 이러한 현상이 발생한 이유로는 감독인력 부족 및 감독자의 용접기술에 대한 이해부족 뿐만 아니라 1970년도 후반의 열악한 제작환경과 기능공의 가공요령등의 인식부족 및 관련 전문기술자가 부족한 상태에서 제작도(Shop Drawing)가 면밀하게 작성되지 못하는등 총체적인 기술 부족에 크게 기인한 것으로 사료된다. 다만, 이러한 과정의 어느 하나만이라도 충실히 수행되었다면 용입부족과 같은 심각한 용접불량은 발생하지 않을 수 있었을 것이라는 아쉬움이 남는다

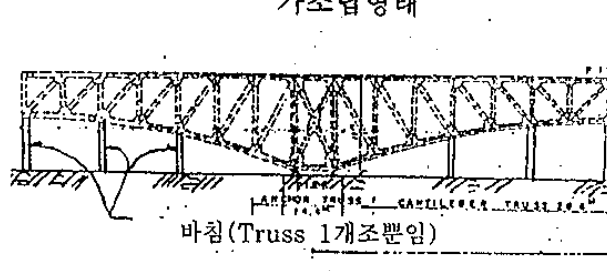
6- 4 조립가설

6-4-1 가조립

가조립은 구조물이 제작도 대로 제작되었는지 여부와 접합부위의 접합방법 및 접합공의 정확한 천공의 순서 등을 검증하고 실구조물의 거동을 확인하는 과정이다. 성수대교 공사보고서의 주요 공정사진을 검토한 바, 앵커트러스 1조만 가조립한 것으로 되어 있으나 사진으로 보아 앵커트러스 1개조의 가조립도 실구조물 거동과 전혀 다른 형태로 되어있다. 즉 앵커트러스의 중앙의 2개 수직재를 앵커하지않고 중앙 수직재를 단순지지하고 그외 편측 3개소씩 총 6개소의 받침을 설치하여 가조립하여 실구조물 가설 형태와 역학적으로 전혀 다른 형식이 되므로 가조립은 실질적인 효과가 없을 뿐만 아니라 아무런 의의가 없고 본 교량의 가조립은 앵커트러스 뿐만 아니라 현수트러스까지 3개조를 완전 가조립해야 실질적인 가조립이 되나 본 교량은 제대로 된 가조립 과정이 생략된 것으로 추정된다.



가조립 형태



단순받침 <실제 가조립 사진>

(그림 6-6) 가조립 형태 분석

6-4-2 조립가설

제작도 작성 및 가조립 등의 미비로 접합부의 접합공 위치가 맞지않아 조립과정에서 확공 내지 재천공하여 접합부가 다소 부실하며, 특히 가조립 생략에 따른 가로보 및 세로보의 접합부는 맞지않는 것이 대부분으로 재천공, 확공 또는 최소연단거리 부족과 볼트접합과 용접까지 겹친곳이 여러곳 발견되었다. 따라서 조립이 매끄럽지못한 결과 본 교량 파괴와는 직접 영향은 없으나 내구성에 상당한 영향을 미칠것으로 추정되며 가설은 앵커트러스를 조립한 후 양단에 가교각으로 바치고 현수트러스를 육상에서 조립 운반하여 앵커트러스에 연결하는 공법으로 하였는바, 구조상 특별한 문제는 없었으나, 주트러스 3조를 각각 가설한후 가로보와 세로보를 연결한 결과 연결부의 결합이 다소 있으며 특히 브레이싱 연결부가 맞지않는 곳이 몇군데 관찰되었다.

6-5 분석 및 고찰

시공 내용을 검토한 결과 당시 기술 수준과 시설 정도로는 충분한 공사기간을 가지고 국내기술진을 최대한 동원, 차분히 한 단계씩 충분한 시험과 검사를 거쳐 제작·시공되어야 될 신공법 (용접 구조)을, 전문기술자의 지도와 검사, 필요한 단계를 거치지 않고 최종 제작을 담당한 용접공이 용접의 성능, 기능 등을 숙지하지 못한채 제작에 임한 결과, 본 교량의 가장 중요한 부분의 맞대기용접이 규격을 벗어났을 뿐 아니라 용접 두께도 전체적으로 규정의 1/2이하이고 수동 용접으로 이루어져 <보고서 사진> 그 신뢰성이 더욱 의심스럽다. 본 교량 제작은 우리나라 용접 교량 초기로 부족한 기술자, 경험 부족, 기능공의 미숙련, 책임감의 결여와 단기간 시공의 강요 등의 복합적 요인으로 가장 정밀하게 제작, 시공되어야 할 강구조를 부실하게 시공한 것으로 판단된다.

7. 감리 및 유지관리 내용 감정

7-1 개 요

당시의 감리체계와 방법, 그리고 1979년 준공 이래의 유지관리체계와 유지·보수 예산, 인력, 기술수준과 그 문제점을 고찰해 보기로 한다.

7-2 감리상 문제점 검토

본 공사 시행시는 현재와 같은 감리 체계는 전혀 없었으며 토목공사는 대부분이 관수공사로 공사 감독 체계로 운영되었다. 즉, 감리는 시공자가 시행한 각종시험성과를 분석하여 타당한지 여부 및 시공자가 수립한 공사 공정과 공법 등에 잘못이 없는지를 살피고, 공사를 제대로 하는지를 점검함은 물론, 적극적으로 시공자의 부족한 기술분야의 자문역까지도 해야 되므로 공사의 성격에 따라 분야별 전문기술자가 꼭 필요하며 많은 인력이 필요한 것이다. 그러나 1970년대는 감리제도가 없고 단순히 감독이라는 공무원이 현장에 파견되어 감독과 감리업무를 모두 책임지는 제도였으나, 그 감독의 파견기준과 예산및 제도가 완벽한 시공감리가 될 수 없었다. 당시 성수대교에는 주감독으로 토목기사(주사 : 6급내지 7급) 1인과 보조감독으로 기원(서기 : 8급내지 9급) 1인, 합계 2인이 모든 감리·감독업무를 수행하였다. 성수대교 정도의 신공법 교량이면 우선 전문기술자 또는 그 수준인 책임기술자 1인과 제작현장에 고급기술자가 용접, 구조별로 각 1인과 보조수 1인, 공사현장에 구조기술자(가설, 콘크리트 각 1인), 기초기술자 1인, 행정요원 1인 등, 최소한 고급기술자 3인과 기술자 및 보조원 5인으로 총 8인의 인력이 있어야 완벽한 공사의 감리·감독이 가능하며, 감독이 필요하다고 판단될 때면 자

체예산으로 시험 등을 시행하고 각종 자체경비를 지출할수 있어야 하나, 현장에는 감독이 쓸 수 있는 예산이 전무하고 다만 감독의 출장비만 있을 뿐이었다. 따라서 당시 제도하에서는 인력 및 기술 부족으로 완벽한 공사를 위한 감독이 사실상 불가능한 상태로 파악된다.

7-3 중차량에 대한 분석

7-3-1 개 요

중차량에 대한 논란이 많으므로 설계하중과 초과하중의 영향을 비교·검토한다. 설계는 일반적으로 전차선에 설계차량이 통행하는 경우에 최대응력이 발생하는 것이 대부분이므로, 실제 통행시에 제하상태와는 많은 차이가 발생할 수 있다. 따라서 왕복 4차선 이상의 교량에서 전차선에 화물을 만재한 설계하중(차량)이 통행할 확률은 매우 적으므로 4차선 이상의 교량에 대한 설계시에는 그 하중의 75%, 3차선은 90% 만 취하도록 규정하고 있으나, 실제로는 중차량이 2차선에 만재되는 일은 거의 없다. 또 구조물에 미치는 하중의 영향은 자중이 차지하는 비율이 도로교에서는 일반적으로 60%이상(장대교에서는 70%정도)으로 차량하중의 영향은 40% 이하이다. 따라서 과적하중이 주 구조에 미치는 영향은 40%이하이며, 또 통행방법(통행시 점유하는 차선수와 진행방향의 차량대수 및 차간거리등)에 따라 큰 차이가 있으나 여기서는 실제 거의 발생할 확률이 없을 정도의 상태로 응력분석을 해 보기로 하였다. 즉 편측 2차선 48.0m 구간 에 3대, 즉 48.0m 편측에 만 6대의 초과하중을 적재하고, 초과하중의 중량은 골재 운반 차량의 전표를 조사한 결과에 따라 가장 큰 것을 선택하여 40.0t으로 결정하여 분석하기로 하였다(그림 7-1).

7-3-2 중차량 해석

1) 강도해석

(1) 설계하중

차량중량 : 6ton

골재중량 : $17\text{m}^3 \times 2.0 \text{ ton/m}^3 = 34\text{ton}$

총 중 량 : 40ton

(2) 재하방법

① 영향선을 검토하여 재하한다(그림 7-1)

② 상행선 2차선에만 편재시키는 경우에 동측 수직재에 최대 인장력이 발생한다.

(3) 결과분석 (수직재의 응력, 그림 7-2)

경 우 1	경 우 2	비 고
980.921 kg/cm ²	1186.404 kg/cm ²	205.483 kg/cm ² (20.9%) 증가

경우 1 : 사하중 + 활하중 (4차선, DL-18)

경우 2 : 사하중 + 활하중 (2차선, DL-40)

총하중 W : 40ton

0.4w 0.1w



후륜 전륜

충격계수 : 1.204

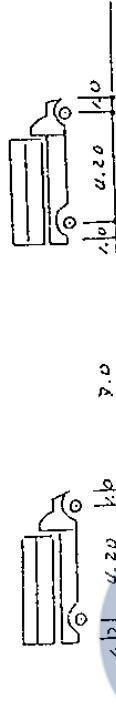
$\therefore 0.1W = 40 \times 1.204 \times 0.1$

$= 4.816 \text{ ton}$

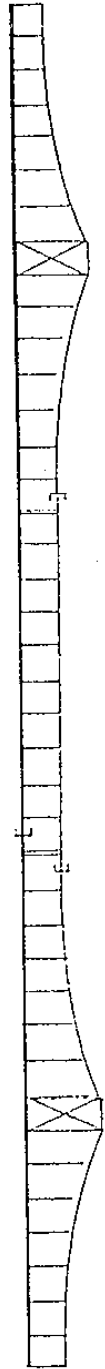
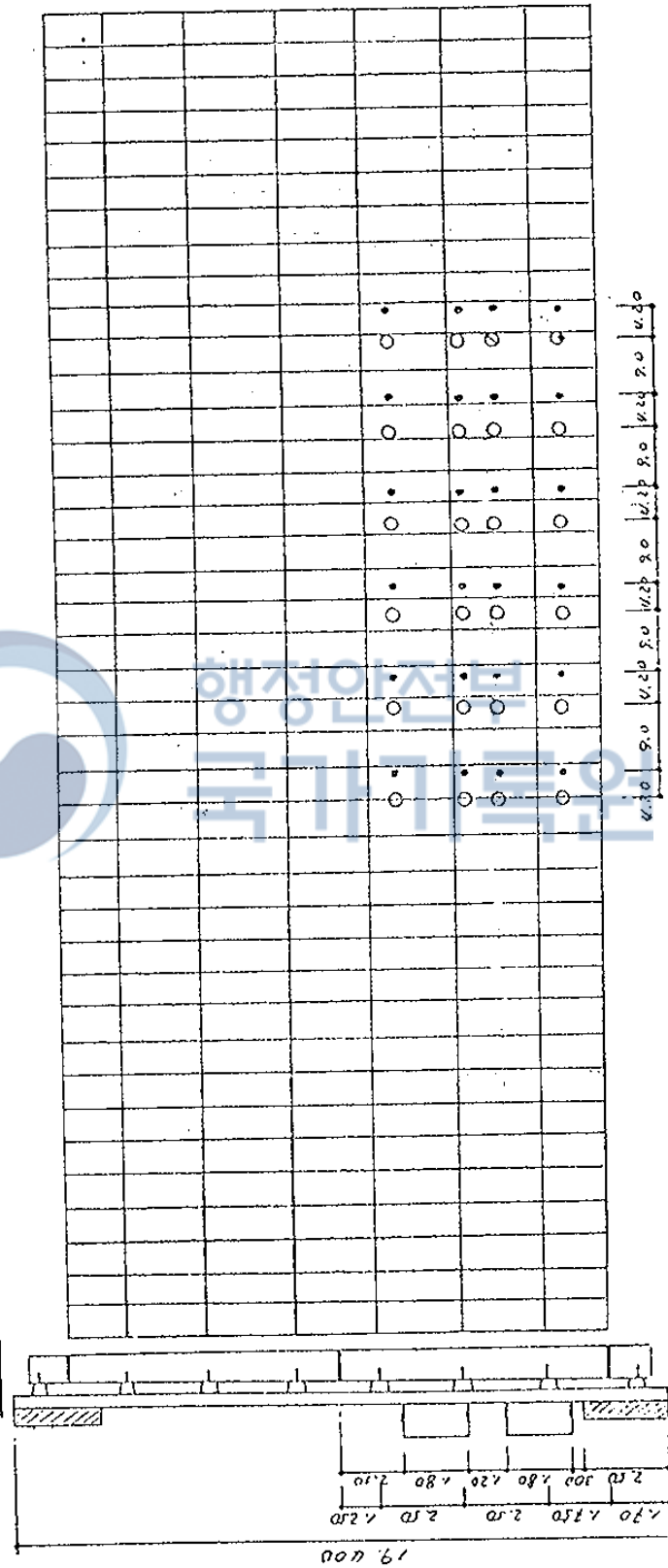
$0.4W = 40 \times 1.204 \times 0.4$

$= 19.264 \text{ ton}$

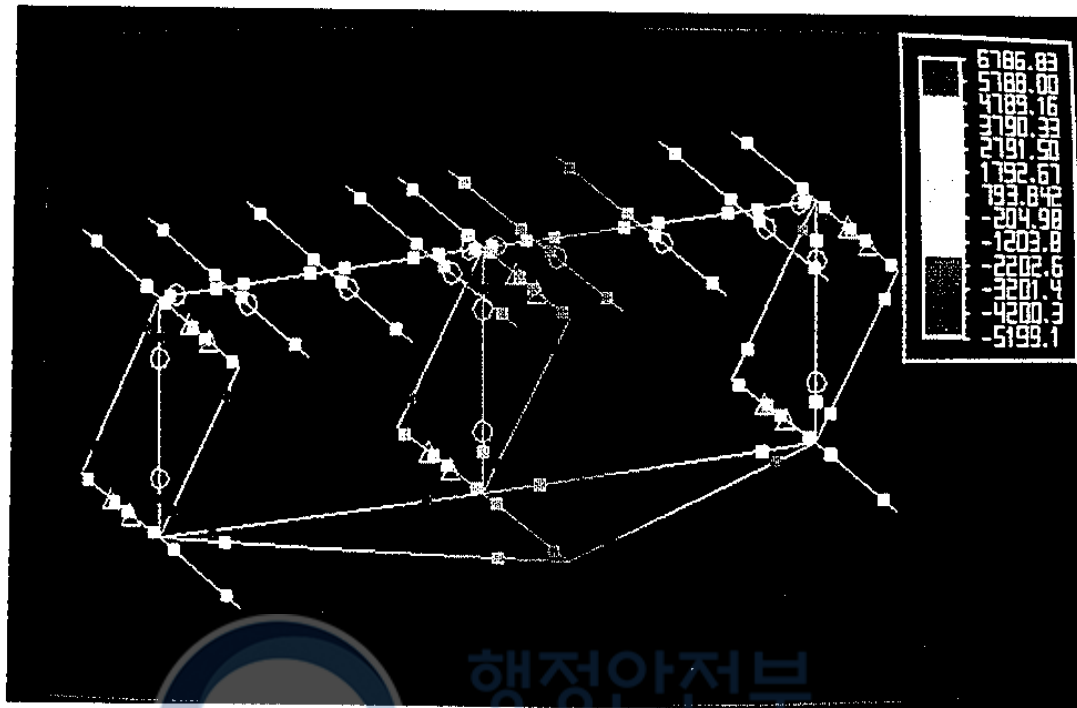
차량하중



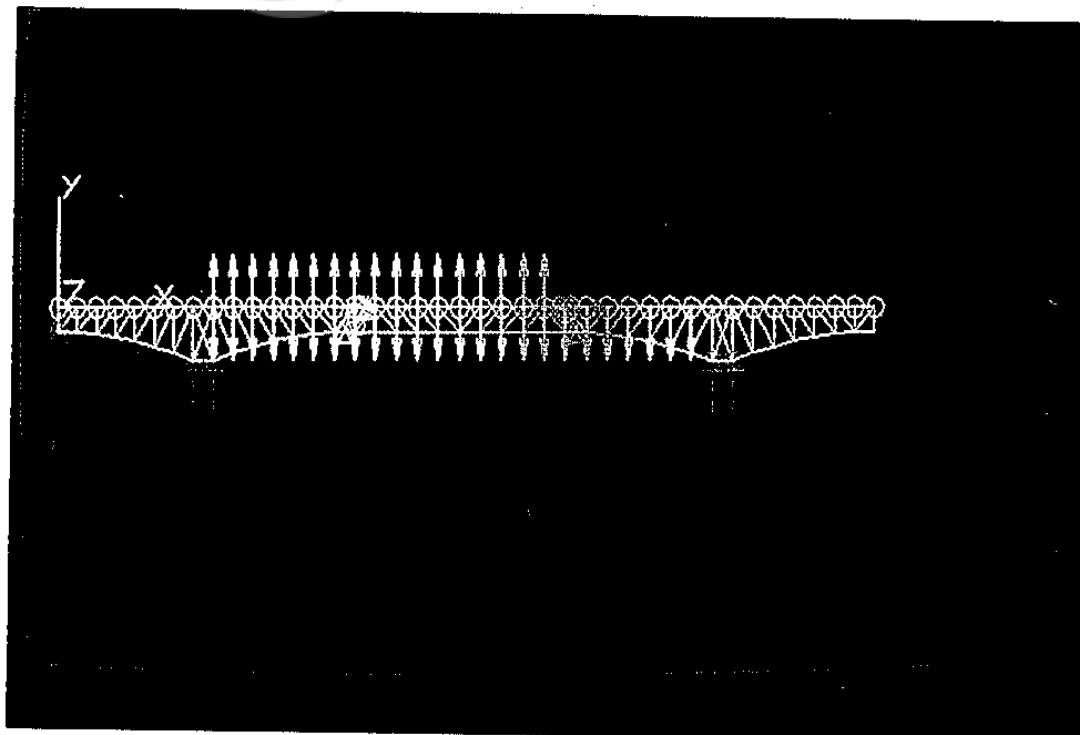
인행 가동차 하중



(그림 7-1) 과적하중 재하



(그림 7-1) 중차량 재하 모델



(그림 7-2) 중차량 재하시 핀연결부위의 부재응력도

7-3-3 중차량에 대한 분석

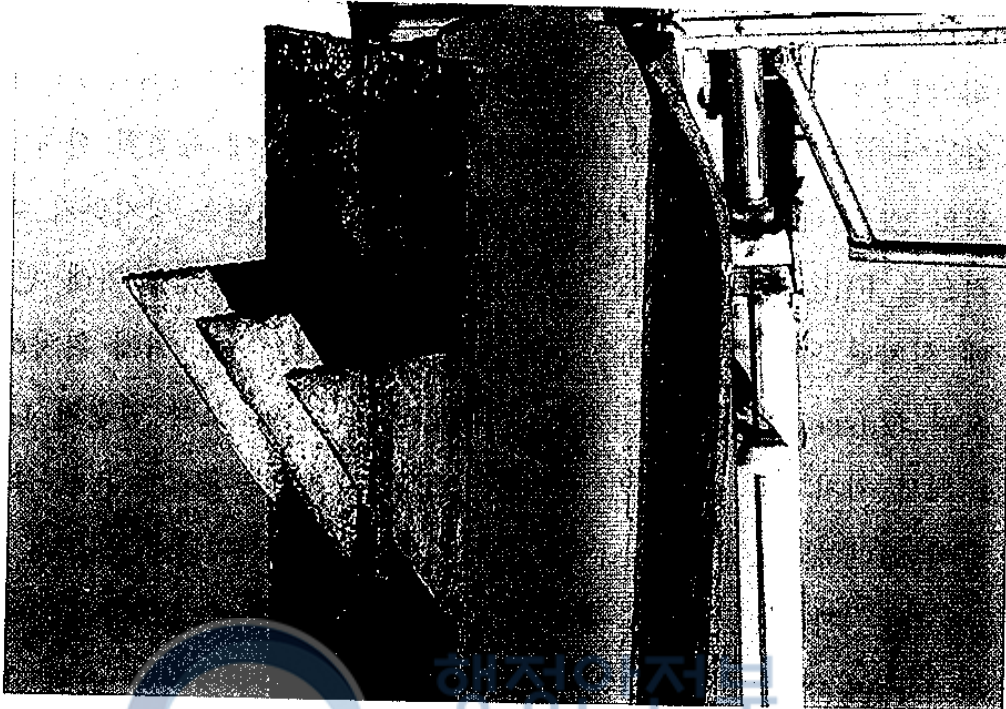
중차량은 실제 통행차량중 가장 무거웠던 골재 덤프트럭을 조사한 결과에 따른 40t으로 하고 48.0m 현수 지간에 편도로 2차선 종방향 3대를 두어 꽉 채운 상태로 계산한 결과 현지부 수직재의 응력이 설계 계산치보다 약 20% 증가하나 40t트럭이 48.0m 구간에 편도 6대가 통행할 확률은 거의 없으며 최대 1차선에 3대 연속(48.0m에 3대이상 진행할 수 없음) 또는 2차선에 각각 1대정도 통행시는 설계 계산치와 비슷한 수준이고, 20%정도 응력이 증가해도 허용응력 범위 내이므로 정역학상 주구조(트러스) 파괴에는 직접 영향이 없는 것으로 판단된다. 그러나 바닥판 세로보, 가로보에는 상당한 영향이 있는 것으로 보이며 피로에 미치는 영향은 피로시험결과와 피로수명해석에서 살펴보기로 한다.

7-4 설치된 Bracket와 가로보 지지구조물의 영향분석

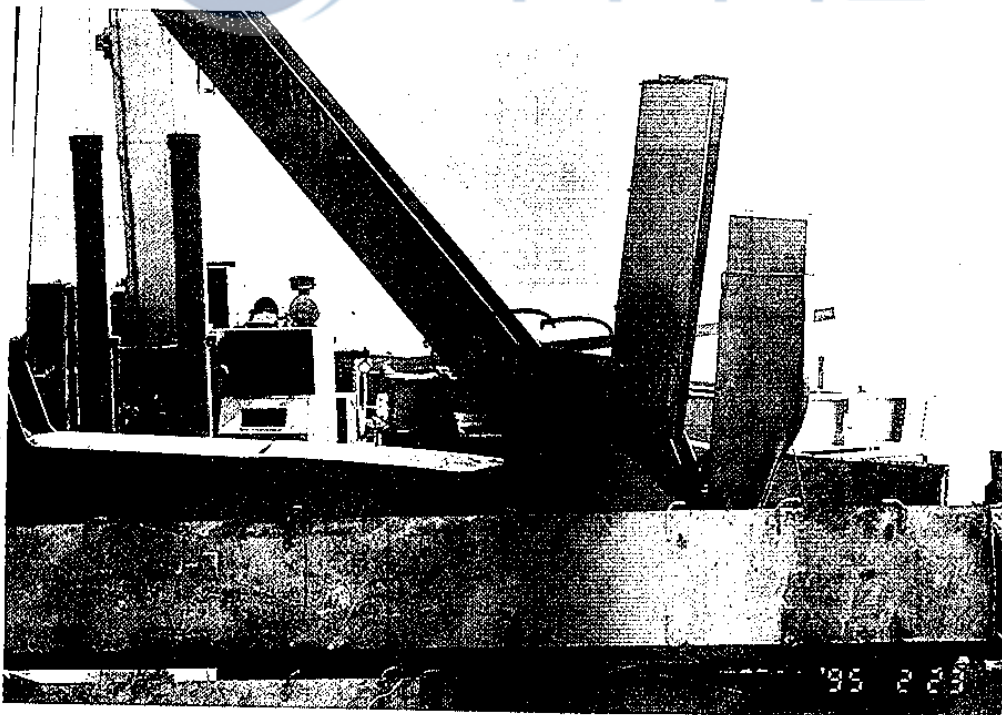
7-4-1 개 요

1) 현 황

붕괴사고가 발생한 성수대교 P10-P11 경간의 상판 신축이음부에 위치한 동측 수직재 상단에는 <사진7-1>에서와 같이 Bracket구조물이 설치되어 있다. 동측 수직재의 하단에는 <사진7-2>에서와 같이 H형강이 수직재와 사재에 Bolt를 연결하여 받침대를 만들고 그 위에 11H형강 기둥을 세워서 다시 H형강이 상부가로보를 지지하게끔 되어있는 가로보 지지구조물이 설치되어 있다.



〈사진 7-1〉 Bracket 구조물 사진
(P10-P11 경간, 동측 수직재)



〈사진 7-2〉 가로보 지지구조물 사진
(P10-P11 경간, 중앙수직재)

Bracket 구조물은 수직재에 용접되어 있는 까치발과 그 위에 놓여있는 Steel Box 및 이 Steel Box를 고정시키기 위하여 Gusset Plate에 용접되어 있는 역 까치발로 구성되어 있으며 수직재에 용접된 까치발과 그 위의 Steel Box의 접촉부에서는 Steel Box의 이탈을 방지하기 위한 목적으로 Fillet용접이 단속적으로 되어 있다. 동측 수직재 아래 편연결부에 설치된 H형강 받침대는 하부 Gusset Plate 바로 위에 위치하고 있으며 Gusset Plate에 용접된 까치발과 하부 가로보에 연결된 L형강에 의해서 지지되고 있다. 동 경간의 중앙 수직재에는 Bracket는 설치되어 있지 아니하였으나 그 하단에는 H형강 받침대가 설치되어 있었다.

P8-P9, P10-P11, P11-P12 경간의 동측 및 중앙 링크수직재에 설치된 Bracket 구조물은 1991년도에 가로보 보수작업시에 유압 Jack의 지지대로 사용하기 위하여 임시로 설치되었으며 작업 완료후 제거하지 아니하여 남아 있었던 것으로 알려져 있다. P8-P9 경간과 P10-P11 경간의 동측과 중앙 수직재의 하단에 설치된 H형강 받침대는 1993년도에 시행된 가로보 보수작업시에 설치된 것으로 알려져 있다. 앞서 설명한 부수적 구조물 설치 현황을 요약하면 (표7-1)과 같다.

(표 7-1) Bracket 구조물과 가로보 지지구조물 설치현황

경 간	수직재위치	Bracket 설치		H형강 받침대설치	
		유 무	시 기	유 무	시 기
P8-P9	동 측	o	1991.10	o	1993.4
	중 앙	x		o	1993.4
P10-P11	동 측	o	1991.10	o	1993.4
	중 앙	x		o	1993.4
P11-P12	동 측	o	1991.7	x	
	중 앙	o	1991.7	x	

2) 문제점

(1) Bracket 구조물 설치로 인한 문제점

가로보 보수작업을 실시하기 위하여 임시로 설치된 Bracket는 결과적으로 Gusset Plate와 수직재의 상대운동을 억제하는 역할을 할 수 있으므로 수직재와 상현재의 Pin연결이 설계와는 달리 자유롭게 회전할 수가 없게 된다. 이로 인해 수직재에는 설계시에 예상하지 아니한 응력이 추가로 발생할 수 있다. 또한 Bracket가 가로보 보수 작업시 유압 Jack의 받침대로 사용되었다면 이로 인해 수직재에는 추가 인장응력이 일시적으로 작용하였을 가능성이 있다.

(2) 가로보 지지구조물 설치로 인한 문제점

이 받침대를 설치함으로써 인해서 수직재와 사재는 일체로 거동할 가능성이 있고 따라서 링크수직재 하단의 연결 Pin이 설계된 기능을 발휘할 수가 없게 되어 수직재에는 설계시 예상하지 아니한 응력이 추가로 발생할 수 있다. 또한 상부 Gusset Plate로 전달되어야 할 상부 가로보의 반력이 H형강 기둥 및 H형강 받침대를 통해서 수직재로 직접 전달될 수 있으므로 이로 인해 수직재에는 설계활하중보다 큰 활하중이 작용할 수 있으며 이 증가된 활하중은 수직재의 피로수명에 영향을 미칠 수도 있다.

7-4-2 Bracket 구조물과 가로보 지지구조물의 영향분석

1) 분석방향

(1) 분석의 경우

Bracket 구조물과 H형강 받침대가 수직재의 구조거동에 미치는 영향은 수직재와 Pin Plate의 용접이음상태에 따라 달라지므로 다음 두

가지 경우에 대하여 그 영향을 검토하였다.

- (가) 수직재와 Pin Plate의 용접이음이 설계대로 시공되었을 경우
- (나) 수직재와 Pin Plate의 용접이음의 실제 시공상태를 고려한 경우
- (다) 분석대상 모델

Bracket 구조물은 1991년도에, H형강 받침대는 1993년도에 설치되어 각각 그 설치시점에 차이가 있으며, (표7.1)에서와 같이 수직재마다 설치내용이 다르므로 분석대상으로 다음 3가지 모델이 고려되었다.

- (가) Bracket 구조물만 설치된 경우
- (나) 가로보 지지구조물만 설치된 경우
- (다) Bracket가 먼저 설치된 후 가로보 지지구조물이 설치된 경우

(3) 고려하중

Bracket 구조물이 설치된 링크수직재에 발생하는 응력상태를 평가하기 위하여 사하중, 활하중, 유압 Jack의 Lift하중, 그리고 온도하중의 영향을 고려하였다. Bracket은 교량의 운영중 설치되었으므로 사하중과 활하중에 대해서는 원래 설계된 구조를 기준으로 응력상태를 해석하였고 온도하중 작용시에는 Bracket의 영향과 이에 추가하여 Pin에서의 마찰력으로 인해 발생하는 휨응력의 영향도 고려하였다. 가로보 지지구조물이 수직재에 미치는 영향을 평가함에 있어서는 사하중, 활하중, 온도하중 및 Pin마찰력의 영향을 고려하였고 특히 활하중의 영향을 평가함에 있어서는 H형강 기둥에 의해서 지지된 가로보의 반력이 수직재로 직접 전달되는 경우를 추가로 고려하였다.

2) 수직재와 Pin Plate의 용접이음이 설계대로 시공된 경우의 영향분석

- (1) Bracket 구조물만 설치된 경우

파단된 P10-P11 경간의 동측 링크수직재에는 (그림 7-3, 7-4)에 도시된 바와 같은 Bracket 구조물이 1991년 10월에 설치되었다. 사하중과 활하중(DL-18 하중)에 의해서 수직재에 발생하는 인장력은 원래 설계된 Truss의 2차원 모델해석 결과에 기준하여 해석하였고, 이때 산출된 인장력을 근거로 하여 Pin 마찰력의 영향을 평가하였다. Bracket의 영향을 평가함에 있어서는 2차원 Truss모델에서 온도변화, $\Delta T = 35^{\circ}\text{C}$ 에 의해 발생하는 수직재의 상·하단 Pin 연결부의 수평상태 변위를 산출하여 Bracket의 영향을 해석할 수 있는 3차원 해석 모델에 입력 값으로 즉, 미리 주어진 변위로 사용하였다. Bracket의 영향을 고려할 수 있는 3차원 해석 모델에서 Bracket은 역학적으로 연직방향 반력과 수평방향 반력으로 모델링되었다.

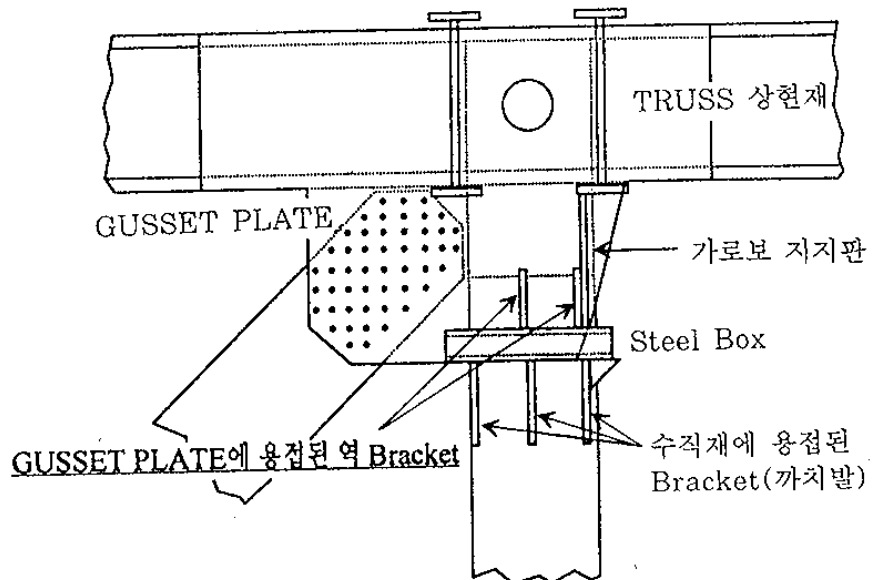
해석결과 얻어진 수직재와 Pin Plate의 용접이음부에 발생가능한 최대인장력은(표7-2)에 주어진 바와같다.

(표7-2) Bracket만 설치된 수직재의 용접이음부에 발생가능한 최대인장응력 계산 결과

구 분	응 력 (kg/cm ²)
Bracket의 영향	175
Pin마찰의 영향	240
축력의 영향 (사하중 + 활하중)	1100
계	1515

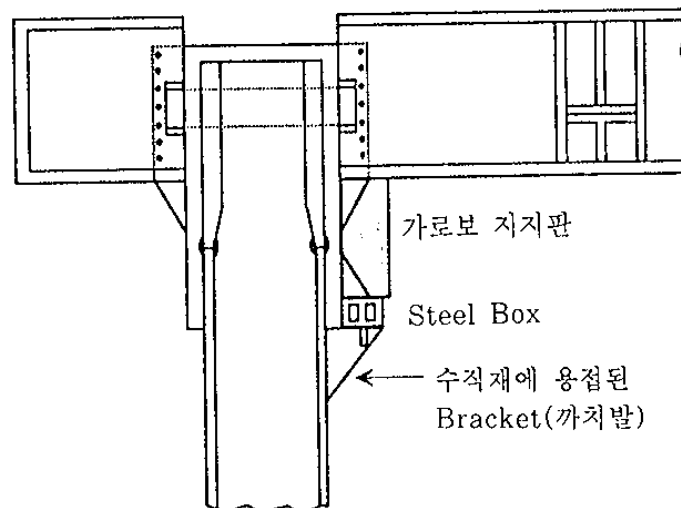
사하중, 활하중 온도하중 작용시 허용응력은 1610 kg/cm²이므로 상기표에서 계산된 최대 인장응력은 허용응력을 초과하지 아니함을 알 수 있다.

가로보(FLOOR BEAM)



(P10-P11 경간, 동측 수직재)

(그림 7-3) Bracket 구조물 설치도 : 정면도



(P10-P11 경간, 동측 수직재)

(그림 7-4) Bracket 구조물 설치도 : 측면도

가로보 보수작업시 유압Jack의 Lift하중에 의해서 일시적으로 수직재의 용접이음부에 발생가능한 응력상태를 해석한 결과는(표7-3)에 주어진 바와같다.

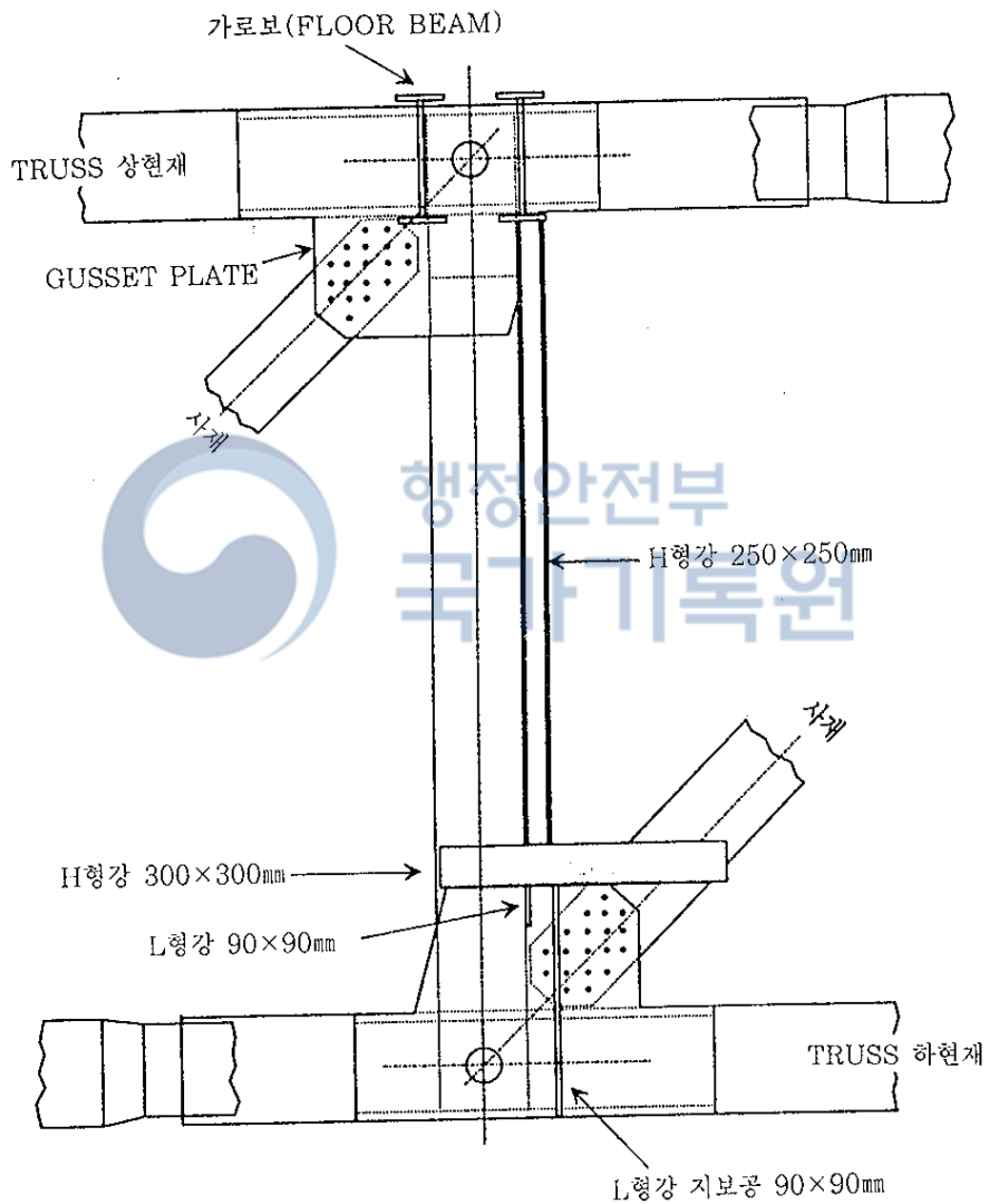
(표7-3) 유압Jack의 Lift하중 작용시 수직재의 용접이음부에 발생가능한 최대인장응력 계산결과

구 분	인장 응력(kg/ cm ²)
유압Jack의 영향	322
축력의 영향 (사하중 + 활하중)	1100
계	1422

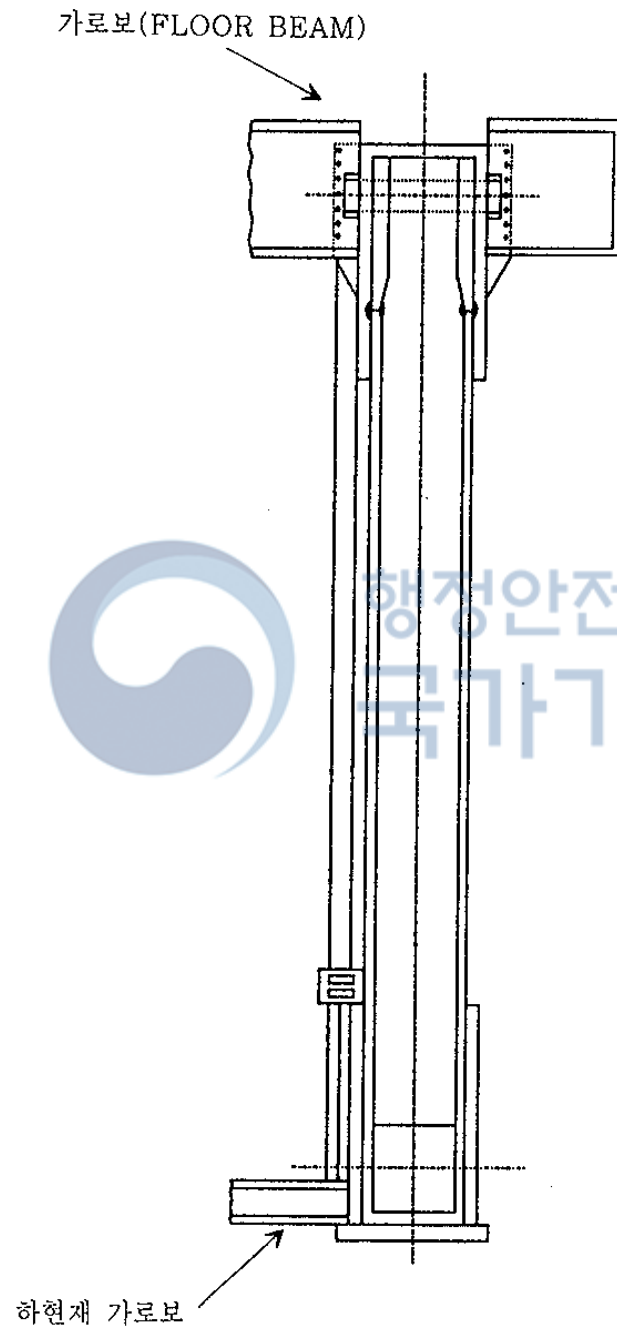
(표 7-2, 7-3)의 계산결과로 부터 Bracket 설치로 인해서 수직재의 용접이음부에 발생가능한 최대 인장응력은 허용응력(1610kg/cm²)을 초과하지 아니함을 알 수 있다. 따라서 수직재와 Pin Plate의 용접이음이 설계대로 시공되었을 경우에는 Bracket 설치로 인하여 수직재가 파단되었을 가능성은 극히 희박한 것으로 판단된다.

(2) 가로보 지지구조물만 설치된 경우

파단된 P10-P11 경간의 중앙 수직재에는 (그림7-5, 7-6)에 도시된 바와 같은 가로보 지지를 위한 H형강 기둥 및 H형강 받침대가 1993년 4월에 설치되었다. 이러한 가로보 지지구조물의 영향을 평가함에 있어서, 이 지지구조물로 인하여 수직재 하단에서의 운동이 구속되어 응력이 추가로 발생하는 경우와 활하중에 대한 가로보의 반력이 수직재로 직접 전달되어서 피로수명에 영향을 주는 경우로 나누어 검토하였다.



(그림 7-5) 가로보 지지구조물 설치도 : 정면도



(그림 7-6) 가로보 지지구조물 설치도 : 측면도

가로보를 지지하는 H형강 기둥의 상단과 하단은 실제적으로 Hinge 역할을 하게되므로 수직재 하단에서의 운동은 주로 H형강 받침대에 의하여 구속된다고 가정함이 타당하다. 이 경우 사하중과 활하중에 의해서 수직재에 발생하는 인장력은 원래 설계된 Truss 모델의 2차원 해석에 의해서 산출하였으며, Pin 마찰의 영향은 2차원 해석결과에 근거하여 평가하였다. 온도하중에 대해서는 H형강 받침대에 의한 구속조건을 반영한 모델이 해석에 사용되었다. 이 해석은 두단계로 수행되었으며, 그 첫단계에서는 H형강 받침대의 구속조건을 고려한 2차원 Truss 모델에서 온도변화 $\Delta T = 35^{\circ} \text{C}$ 가 주어질 때 발생하는 Truss 절점의 변위를 해석하였다. 두번째 단계에서는 2차원 해석 결과를 3차원 모델에 대한 입력으로 사용하여 수직재에 발생한 응력 상태를 정밀하게 해석하였다.

수직재와 상단 Pin Plate와의 용접이음부에서 발생하는 인장응력을 계산한 결과는 (표 7-4)에 주어져 있다.

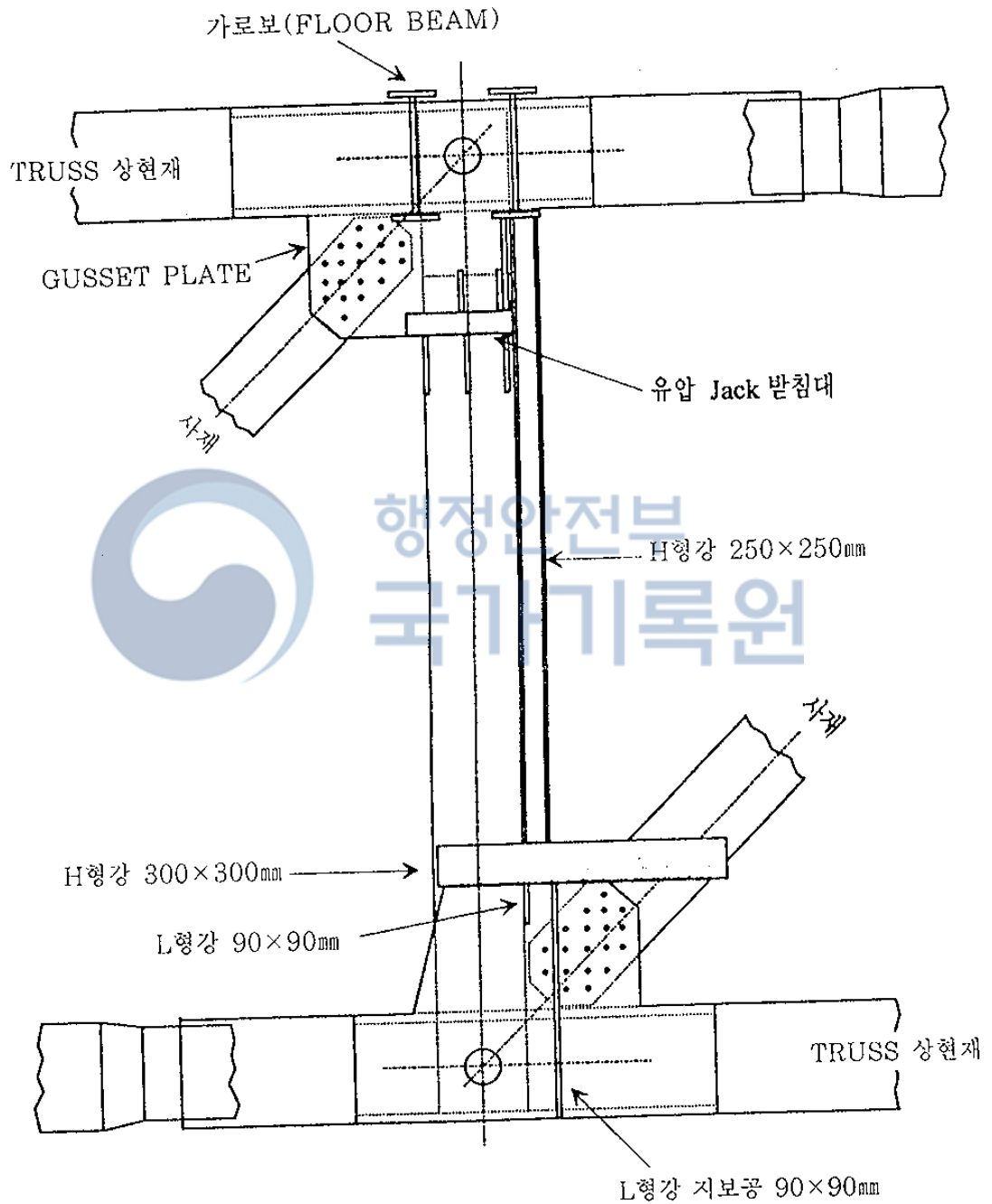
(표7-4) 가로보 지지구조물이 설치된 수직재의 상단용접이음부에 발생가능한 최대인장응력 계산결과

구 분	응 력 (kg/cm^2)
가로보 지지구조물의 영향	665
Pin 마찰의 영향	-240
축력의 영향 (사하중+활하중)	1100
계	1525

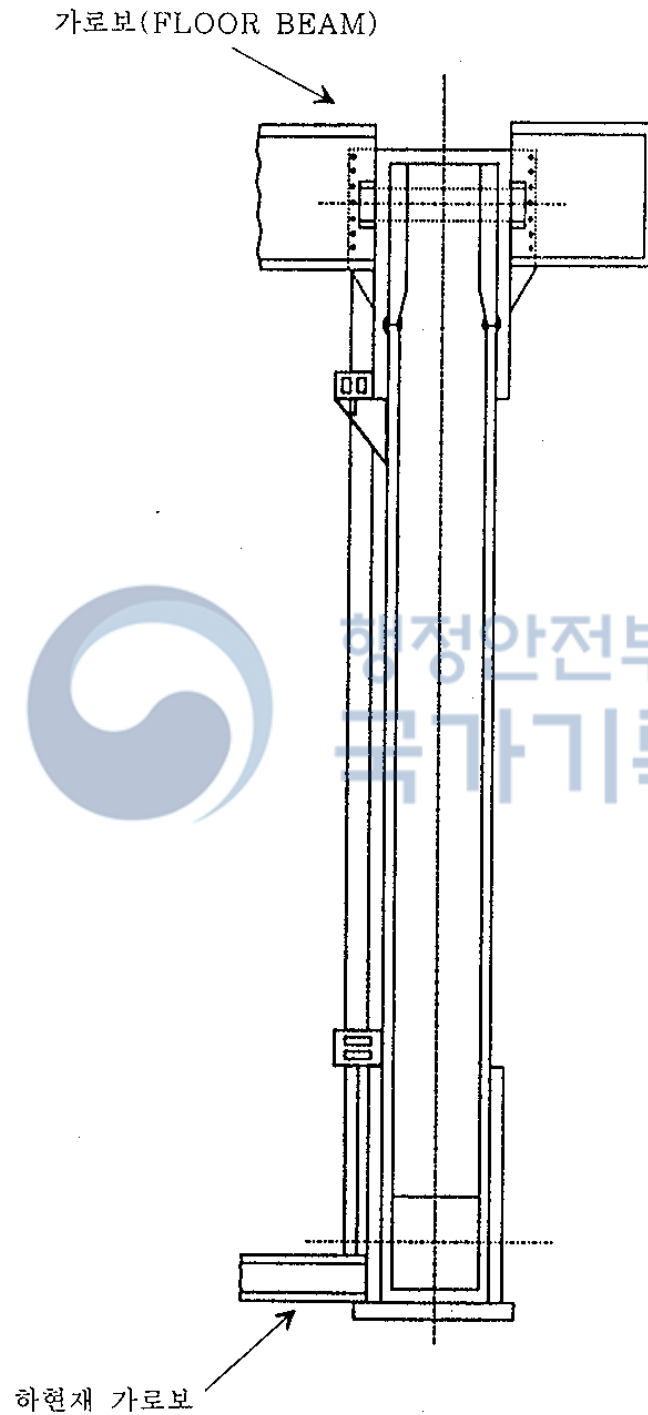
해석결과로부터 다음 두가지 특기 사항이 관찰되었다. 하나는 온도하중에 의한 응력과 Pin 마찰에 의한 응력은 그 부호가 서로 다르다는 것이고, 다른 하나는 수직재의 높이에 따라서 응력의 분포가 변화하는데, H형강 받침대가 설치되어있는 수직재의 하단에 가까워 질수록 그 크기가 증가한다는 사실이다.

가로보 지지구조물이 설치된 경우 가로보의 반력의 전달과정을 해석한 결과 가로보의 반력은 수직재로 바로 전달될 수 있음이 얻어졌다. 이 경우에는 수직재의 피로수명이 극히 경미하게 영향을 받을 수 있으나 설치시점이 1993년이고 붕괴사고는 1994년 10월에 발생한 사실을 고려하면 수직재의 용접이음이 설계대로 시공되었을 경우에는 가로보 지지구조물 설치로 인해 수직재의 파단이 유발되었을 가능성은 극히 희박한 것으로 검토되었다.

- (3) Bracket 구조물이 먼저 설치된 후 가로보 지지구조물이 설치된 경우 파단된 P10-P11 경간의 동측 수직재에는 (그림7-3, 7-4)에 도시된 바와 같은 Bracket 구조물이 1991년 10월에 설치되었고, 1993년 4월에는 다시 가로보 지지를 위한 구조물 즉 H형강 기둥 및 받침대가 (그림7-5, 7-6)에 도시한 바와같이 설치되어 있었다. Bracket 구조물 설치 이후 일년 반이 경과한 후 가로보 지지 구조물이 다시 설치되었으므로 Bracket 구조물은 인장력 전달기능을 모두 상실하였다고 봄이 타당하다. 따라서(그림7-7, 7-8)에 도시한 바와 같이 Bracket 구조물과 가로보 지지구조물이 잔존하여 있는 1993년 4월 이후에 수직재에 발생하는 응력상태 해석을 위해서는 (2)절에서 가로보 지지구조물만 설치된 경우의 해석모델에 (1)절에서 적용한 Bracket로 인해서 수직재에 가해지는 외력의 영향을 추가로 고려하면 될 것이다. 물론 이 경우에도 Pin 마찰의 영향을 별도로 포함하여야 한다.



(그림 7-7) Bracket 구조물과 가로보 지지구조물 설치도 : 정면도



(그림 7-8) Bracket 구조물과 가로보 지지구조물 설치도 : 측면도

이러한 방법에 의해서 수직재와 상부 Pin Plate와의 용접이음부에서 발생가능한 인장응력을 해석한 결과는(표7-5)에 주어져 있다.(표7-6)의 결과에서 실제 파단이 발생한 상부 용접이음부에서는 허용응력을 초과하지 아니하는 인장응력이 발생하나 오히려 H형강 받침대가 설치되어 있는 지점에서 더욱 큰 값의 인장응력이 발생함을 알 수 있다.

(표 7-5) Bracket 구조물과 가로보 지지구조물이 설치된 수직재의 상단용접이음부에 발생가능한 최대인장응력 계산결과

구 분	응 력 (kg/ cm ²)
가로보 지지구조물의 영향	680
Pin 마찰의 영향	-240
축력의 영향 (사하중+활하중)	1100
계	1540

이러한 계산 결과는 (2)절의 해석결과와 동일한 경향을 보여주고 있으며 파단이 발생하지 아니한 위치에서 수직재의 응력이 용접이음부에서의 인장응력보다 크게 계산되었다는 점에서는 (1)절의 해석 결과와도 그 경향이 동일하다.

(4) 분석 결과의 비교 검토

상기 분석 결과를 요약비교하면 다음과 같다.

가) Bracket 구조물만 설치된 경우(1991.10~1993.4, 동측 수직재, P10-P11 경간)

(i) Bracket 설치로 인하여 추가로 발생한 인장응력을 고려하더라도 용접이음부에서 최대 인장응력은 허용응력을 초과하지 아니하였을 가능성이 높다.

- (ii) 유압 Jack의 하중이 일시적으로 작용할 경우에도 최대인장응력은 허용응력을 초과하지 아니하였을 가능성이 높다.
- (iii) Bracket 설치로 인하여 추가로 발생하는 인장응력은 용접이음부가 아니라 Bracket 설치된 지점에서 더 크게 발생한다.

나) 가로보 지지 구조물만 설치된 경우(1993.4~1994.10, 중앙 수직재, P10-P11 경간)

- (i) 가로보 지지 구조물 설치로 인하여 추가로 발생하는 인장응력을 고려하더라도 수직재의 상부 용접이음부에서 발생하는 최대인장응력은 허용응력을 초과하지 아니하였을 가능성이 높다.
- (ii) 가로보 지지구조물 설치로 인하여 가로보의 반력이 수직재로 직접 전달되어도 수직재의 피로 수명에 미치는 영향은 극히 경미하다.
- (iii) 가로보 지지구조물 설치로 인하여 추가로 발생하는 인장응력은 상부 용접이음부에서보다도 하부 H형강 받침대 설치 지점에서 더 크게 발생한다.

다) Bracket 구조물이 설치된 후 가로보 지지 구조물이 설치된 경우(1993.4~1994.10, 동측 수직재, P10-P11 경간)

- (i) 가로보 지지 구조물 설치로 인하여 추가로 발생하는 인장응력을 고려하더라도 수직재의 상부 용접이음부에서 발생하는 최대인장응력은 허용응력을 초과하지 아니하였을 가능성이 높다.
- (ii) 가로보 지지구조물 설치로 인하여 가로보의 반력이 수직재로 직접 전달되어도 수직재의 피로 수명에 미치는 영향은 극히 경미하다.
- (iii) 가로보 지지구조물 설치로 인하여 추가로 발생하는 인장응력은 상부 용접이음부에서보다도 하부 H형강 받침대 설치 지점에서 더 크게 발생한다.

상기 비교결과를 검토하여 보면 수직재와 Pin Plate의 용접이음이

설계대로 시공되었다면 Bracket 구조물과 가로보 지지 구조물 설치로 인하여 수직재와 Pin Plate의 용접이음부가 파단되었을 가능성은 극히 낮다고 보여진다. 더욱이 이러한 구조물의 설치로 인해서 용접이음부가 아니라 수직재의 다른 부분에서 더 큰 인장응력이 추가로 발생 할 가능성이 높다. 그럼에도 불구하고 상부 Pin Plate와 수직재의 용접이음부에서 파단이 발생하였다는 사실은 그 용접 이음이 설계대로 시공되지 아니한 사실이 수직재 파단의 직접적인 원인이었을 가능성이 매우 높음을 강력히 시사하고 있다.

3) 수직재와 Pin Plate의 용접이음의 실제 시공상태를 고려한 경우

성수대교 붕괴사고 직후 사고원인 조사반이 조사한 바에 의하면 가로보 지지구조물이 설치되어 있던 P10-P11 경간의 중앙 수직재의 Pin Plate와의 용접이음부에서 하류측 Flange의 용접이음이 붕괴사고 발생 전에 이미 파괴되어 있었음을 알 수 있다. 그런데 가로보 지지구조물은 수직재의 상류측 Flange에 설치되어 있었으며 이 경우 해석결과에 의하면 상류측 Flange에 하류측 Flange에서보다 더 큰 인장응력이 발생할 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 하류측 Flange의 용접이음이 붕괴사고전 미리 파괴되어 있었다는 사실은 하류측 Flange의 용접이음의 파괴는 가로보 지지구조물 설치와는 무관하게 즉 가로보 지지구조물 설치 이전에 이미 발생하였을 가능성이 높음을 보여주고 있다. 또한 Bracket 구조물이나 가로보 지지구조물이 전혀 설치되지 아니한 인접 경간의 수직재의 연결부위에서도 Flange의 용접이음부에서 시작된 균열이 수직재의 복부판으로 상당히 진행된 경우가 발견되었는 바 이 사실은 수직재와 Pin Plate의 용접이음의 실제 시공상태가 균열 발생 및 성장의 직접적인 원인이 되었다는 것을 뒷받침하고 있다. Bracket 구조물과 가로보 지지구조물이 설치되어 있던 붕괴된 P10-P11 경간의 동

측수직재의 파단면 사진을 관찰하면 수직재의 하류측 Flange의 용접이음이 붕괴사고 발생시점 이전에 이미 파괴되어 있었음을 확인할 수 있다. 그러나 Bracket 구조물과 가로보 지지구조물이 수직재에 미치는 영향을 분석한 결과에서는 파단된 용접 이음부가 아니라 수직재의 다른 부분, 즉, Bracket 구조물이 설치된 지점 또는 H형강 받침대가 설치되었던 지점에서 더 큰 인장응력이 추가로 발생하게 된다. 그럼에도 불구하고 상부 Pin Plate와 수직재의 이음부의 Flange 용접이음부가 붕괴사고 전에 파괴되어 있었다는 사실은 수직재 Flange 용접이음부의 파괴는 Bracket 구조물 또는 가로보 지지 구조물의 설치와는 무관하게 발생하였을 가능성이 높다는 것을 보여주고 있다.

Flange 단면의 일부만 용접되어 있는 실제 시공상태를 고려한 3차원 해석에 의하면 Flange의 용접연결부에서 발생할 수 있는 인장응력은 설계대로 시공된 경우에 비하여 2~4배 정도 증가될 가능성이 매우 높은 것으로 계산되었다. 이 계산결과는 Bracket 구조물이나 가로보 지지구조물이 설치되지 아니한 수직재의 용접 이음부에서의 균열이 발생하여 성장하고 있는 사실과 일치하고 있으며, 파단된 동측수직재에서도 Flange의 용접이음이 Bracket 구조물이나 가로보 지지구조물 설치 이전에 파괴되었을 가능성이 높다는 것을 뒷받침하고 있다.

따라서 Bracket 구조물이나 가로보 지지구조물의 설치가 성수대교 붕괴사고의 직접적인 원인이 되었다고는 판단되지 아니한다. 그러나 용접이음 상태가 지극히 부실한 실제 시공상태 하에서는 Bracket 구조물 또는 가로보 지지구조물 설치와는 무관하게 형성되어 성장하고 있던 수직재와 상부 Pin Plate 간의 용접이음부의 균열의 성장이 Bracket 구조물 또는 가로보 지지구조물의 설치로 인하여 촉진되었을 가능성은 있다.

7-4-3 결 론

성수대교의 트러스에 위치한 일부 수직재에는 Bracket 구조물 또는 가로보 지지구조물이 설치되어 있었다. 붕괴 사고가 발생한 P10-P11 경간의 동측수직재에는 Bracket 구조물과 가로보 지지구조물이 모두 설치되어 있었고, 동 경간의 중앙 수직재에는 가로보 지지구조물만 설치되어 있었다. 그러나 서측 수직재에는 이러한 구조물 들이 설치되어 있지 아니하였다. P10-P11 경간에서는 Bracket 구조물은 1991년 10월에, 가로보 지지구조물은 1993년 4월에 각각 설치되었음이 확인되었다.

성수대교의 붕괴사고는 P10-P11 경간의 수직재의 상부 Pin Plate와 수직재와의 용접이음부 파단에서 비롯되었다. P10-P11 경간의 수직재에 설치되었던 Bracket 구조물 및 가로보 지지구조물과 수직재 파단과의 상관관계를 규명하기 위하여 해석적 연구 및 실제 시공상태에 대한 검토를 시행한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

첫째, Pin Plate와 수직재의 용접이음이 설계대로 시공되었을 경우에는 Bracket 구조물과 가로보 지지구조물이 설치되었더라도 그로 인해 수직재의 파단이 초래되었을 가능성은 없다. 이러한 부수적 구조물의 설치로 인해 수직재 파단이 비롯되었다고 가정할 경우에는 그 파단은 용접이음부가 아닌 수직재의 다른 부분에서 발생되었어야만 했다.

둘째, Pin Plate와 수직재 Flange와의 용접이음이 설계대로 이루어지지 아니한 실제 시공 상태하에서는 Bracket 구조물 및 가로보 지지구조물의 설치와는 무관하게 발생하여 잘 발달되었던 균열의 성장이 Bracket 구조물 또는 가로보 지지구조물의 설치로 인하여 촉진되었을 가능성은 배제할 수 없다.

7-5 유지 관리상 문제점

성수대교 건설을 전후한 기간의 유지관리 체계는 중앙부처를 비롯하여 각 지방자치단체 및 국영기업체의 경우에까지 형식적이었고, 그 인력과 예산은 극히 미비한 상태였다. 즉 전시행정이 팽배하고 또 사회 간접 자본은 정치적으로 좌우되고 선거공약이 난무하던 시절로 우선 건설에만 치중하였고, 생색이나 눈에 띄는 전시효과가 없는 유지관리 및 보수에는 거의 무관심하였다. 따라서, 실제 유지관리 및 보수에 필요한 예산이 턱없이 부족한 실정이며, 그늘에서 일하는 사람을 인정하지 않거나 전문기술인이 대접을 받지 못하는 풍토였다.

성수대교 건설후의 유지관리 체계를 살펴보면, 준공직후는 서울시의 주요 구조물의 유지관리를 건설국 도로과 보수계에서 토목기좌(사무관)를 계장으로 하여 인원 5, 6명이 직접 관리하다가 1986년부터 동부건설사업소와 남부건설사업소에서 유지 보수 실무를 담당 하였으나, 1994년부터 서울시 건설사업소 직제규칙을 개정하여 조직을 정비하고 분장업무를 세분화하여 보수2과의 시설 1, 2계로 하여금 교량보수의 계획수립 및 시행 사무를 분장토록 하였다. 그러나 유지관리 및 보수 업무에는 담당자가 해당 구조물의 전문가이거나 최소한 전문가의 자문을 수시로 받을 수 있는 제도와 예산이 필요한데, 과거에는 물론 현재에도 전문기술인력 및 예산의 부족등으로 체계적이고 전문적인 유지관리가 되지 않았던 것이 사실이다. 긴급 보수에 필요한 최소한의 예비비를 사업소에 두고 시급할 때 쓸 수 있는 제도가 기본적으로 필요한 것이다. 따라서 과거의 유지관리체계를 보면 전문기술이 없는 평범한 일반기술직의 담당업무에 보직하고 예산의 부족과 경직된 예산운용 체계 때문에 근본적인 유지관리가 어려웠던 것이 사실이다.

성수대교 준공 후의 유지 관리 기록을 살펴보면 1986년부터 1994년까지의 유지 보수 예산이 2억6천만원으로 연간 3천만원이 못되며, 그나마 교량의 조사, 점검 및 안전진단 등에 관련된 예산은 전무하고 대부분이 교량상에서 육안으로 보이는 신축이음 보수가 대부분이고 약간의 기타 부분(바닥판 콘크리트, 받침 등)의 보수가 있을 뿐이다.

유지관리 보수는 건설보다 한발 앞선 기술과 더 많은 경험을 필요로 하며 따라서 유지 관리에는 유능한 전문기술자를 보직하고 충분한 예산의 뒷받침이 있어야 한다



행정안전부
국가기록원

8. 직접 붕괴 원인 분석

8-1 개 요

게르버 연속 트러스구조 형식인 성수대교 상부구조의 붕괴기구(mechanism)는 다음과 같이 요약할 수 있다. 이미 앞에서 밝혀진 바와 같이 붕괴는 사고지간 중앙부 현수트러스의 복단 앵커트러스와의 연결부를 지지하고 있던 3개의 편연결 수직재 용접부의 피로균열 손상이 붕괴한계에 도달한 상태에서 사고시점에 차량 몇 대가 통과하는 순간 수직재가 최종적인 극한강도파괴를 일으키며 일시에 연속 파단되면서 중앙부 현수트러스의 붕락을 가져온 사고였다.

성수대교와 같은 장대교량이 지진이나 태풍같은 천재지변이 아닌 정상 공용도중에 이와 같이 순간 붕괴되는 사례는 외국에서도 드물지만 간혹 찾아볼 수는 있다. 외국의 경우에도 60년대 이전에 가설된 교량중에 게르버형식 교량과 같이 파괴위험부재(Fracture Critical Member)를 갖는 여용성이 거의 없는 구조형식에서 유지관리를 소홀히 한 채 방치되거나 취성이나 피로균열 손상의 진전을 육안으로는 발견할 수 없는 구조물에서 일어난 경우가 많다. 성수대교의 붕괴 원인은 근본적으로는 당시 교량의 계획·설계·시공 및 유지관리 전반에 걸친 낙후된 기술·불합리한 제도·규정 및 그릇된 관행과 실적·전시·편의 위주의 행정에서 비롯되었다. 이는 결과적으로 성수대교의 설계·시공·유지관리 전반에 걸친 부실을 유발시켰고, 이들 부실요인들이 서로 복합적으로 상승작용을 하여 교량의 붕괴사고를 가져왔다고 본다.

그러나, 성수대교의 붕괴는 이 교량의 생명선이라 할 수 있는 파괴위험부재인 편연결 수직재가 부실시공으로 불량하게 용접된 데에다, 차량통행과 급

격한 교통량 증가로 편 수직재 용접부에 피로균열 손상이 누적되며 진전 확대되어 오다가, 도중에 수직재에 대한 점검·보수가 전혀 없이 피로균열을 그대로 방치해 온 결과 일반통행하중하 수직재의 응력이 잔류강도를 초과하는 순간 발생한 것이다. 그렇기 때문에 성수대교 붕괴는 어느 한 두 가지의 부실이나 과오로 인하여 발생한 참사가 아니므로 지배적인 원인은 편수직재의 부실시공과 유지관리의 결여로 압축할 수 있지만 복합적인 직접 붕괴원인의 명쾌하며 신뢰도가 높은 분석은 데이터의 부족으로 어렵다.

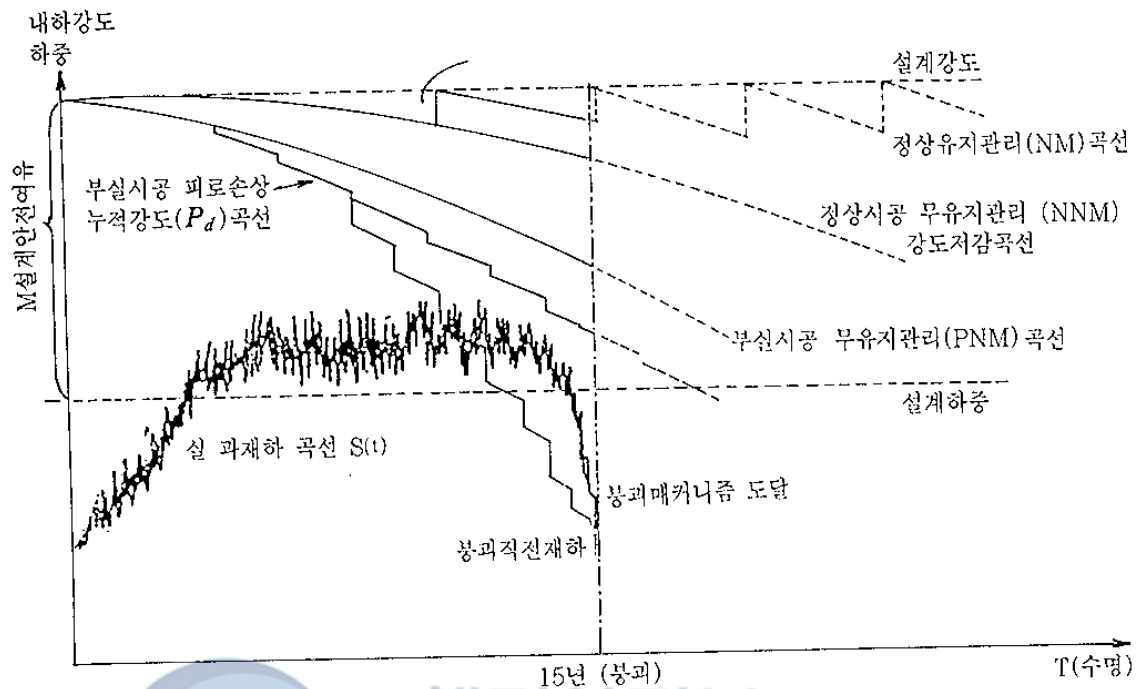
대개의 경우 구조물이 여유성을 갖고 있는 경우에는 다재하경로, 다파괴경로를 통해 붕괴되기 때문에 최초 부재의 파괴 후에 붕괴기구가 형성되는 순간까지는 하중의 재분배와 점진적인 대변형의 유발 등으로 경고가 있기 마련이다. 그러나, 본 성수대교와 같이 여유성이 전혀 없는 교량의 파괴위험부재인 편연결 수직재의 용접결함으로 인한 초기 취성균열 또는 응력집중으로 인한 피로손상균열이 장기간 성장·진전되면서 극한잔류강도 내력이 초과하는 순간 붕괴된 경우는 붕괴에 임박한 시점에 이상진동은 느낄 수 있지만 명백한 경고가 없이 순간 발생할 수 있다.

다시 요약하자면, 편수직재의 부적절한 설계 상세로 인한 2차응력이나 설계를 무시한 불량용접, 용접결함으로 인한 용접부위의 취성화, 유지관리 전면부재로 인한 열화손상의 누적 등으로 피로강도가 저하되고 여기에 중차량 통행의 방치로 인한 피로수명의 단축 등이 있는 경우, 그리고 결정적으로 이러한 위험상황이 적절한 유지관리를 통하여 발견되지 않고 방치되는 경우 이번 사고와 같이 예측할 수 없는 붕괴기구의 형성시점에 도달하는 순간 과적상태도 아닌 가벼운 차량통행 상황하에서 붕괴가 일어난다.

이상에서 살펴본 바와 같은 성수대교의 붕괴 조건을 보다 쉽게 개념적으로 이해하기 위하여 붕괴가 일어날 때까지의 교량내하력 및 재하상태의 경년

변화를 내하강도 저감곡선과 재하곡선을 이용하여 개략적으로 스케치하면 (그림 8-1)과 같이 나타낼 수 있다. (그림 8-1)로 부터, 성수대교의 붕괴는 다음과 같이 설명할 수 있다.

- 구조물은 설계시방서를 만족하는 정상적인 설계내하강도 R_0 와 설계하중 S_0 에 의해 설계되고 제대로 시공된 경우 설계안전여유 $M=R_0-S_0$ 을 갖게 된다.
- 경년에 따라 구조물의 내하강도는 지수적(exponential)으로 감소하여 $R(T)=R_0e^{-\lambda T}$ 로서 지수곡선으로 되기 때문에 그림에서 NM곡선과 같이 주기적인 유지보수에 의해 내하력을 회복시켜서 설계강도에 근접하는 내하력을 유지시켜야 한다.
- 만일 효과적인 유지관리가 없는 경우에도 천재지변없이 정상적으로 열화되는 NNM곡선같이 되어 내하력이 감소해도 설계 안전여유보다 적은 피로강도한계(threshold) 이하의 과재 반복하중하에서는 붕괴가 일어날 수 없다.
- 반면에 부실시공이 되고 유지관리가 없는 경우에는 PNM곡선으로 되어 강도가 현저하게 설계강도에 못미치게 되어 위험할 수 있으나 중차량의 과도한 통행이 없으면 붕괴는 되지 않는다.
- 그러나 여기에는 중차량의 과도한 통행이나 설계, 제작상의 결함, 유지관리 부실 등으로 인한 열화 손상에 의해 비정상적으로 큰 2차응력이나 국부응력이 발생하여 수직재의 피로손상 등이 누적되는 경우 수직재의 내하강도는 P_d 곡선과 같이 되므로 강도가 경년에 따라 급격하게 감소하게 되고 실재하곡선 $S(t)$ 와 만나게 되는 시점($T=15$ 년)에서 붕괴하게 됨을 알 수 있다.



(그림 8-1) 교량내하력 및 재하상태의 경년 변화

그리고 위에서 언급한 편연결 수직재의 용접부에서의 불량용접외에 이 장의 피로수명 및 붕괴 위험도 분석결과에서 밝혀진 설계, 시공 및 유지 관리면에서 피로손상을 더욱더 가속화시킨 결함요인을 살펴보면 다음과 같다.

- 시공면에서는 수직재 불량용접외에 게르바 편연결 수직재의 상세도 (그림 8-2)에서 보는 바와 같이 수직재 상단 편플레이트의 변단면부 테이퍼 경사가 설계도면의 1/10보다 몇 배나 급하다.
- 설계면에서는 전반적으로 편수직재의 편연결 상세설계가 부적절하게 되어 있지만, 특히 편플레이트 복부상단부가 편과 분리된 자유단으로 설계되어 있어 응력의 흐름이 계측결과에서 입증되었듯이 편에서 플랜지로 급격하게 전달되어 St. venant 효과에 의해 플랜지 용접부위의 국부응력집중이 심하게 되고 결과적으로 피로응력범위가 크게 높아지게 되어 있다.

- 유지관리면에서는 붕괴 구간의 복단 동측 수직재를 비롯한 일부 수직재의 경우 가로보 보강용으로 지지브래킷을 수직재 플랜지에 직접 용접하여 설치하고 여기에다 수직재 하단에서 편 수직재의 변위를 구속하도록 지지되는 가로보 지지 버팀재를 설치하는 보수행위로 인하여 추가로 2차 응력이 다소 증가하는 결과를 초래하였다.

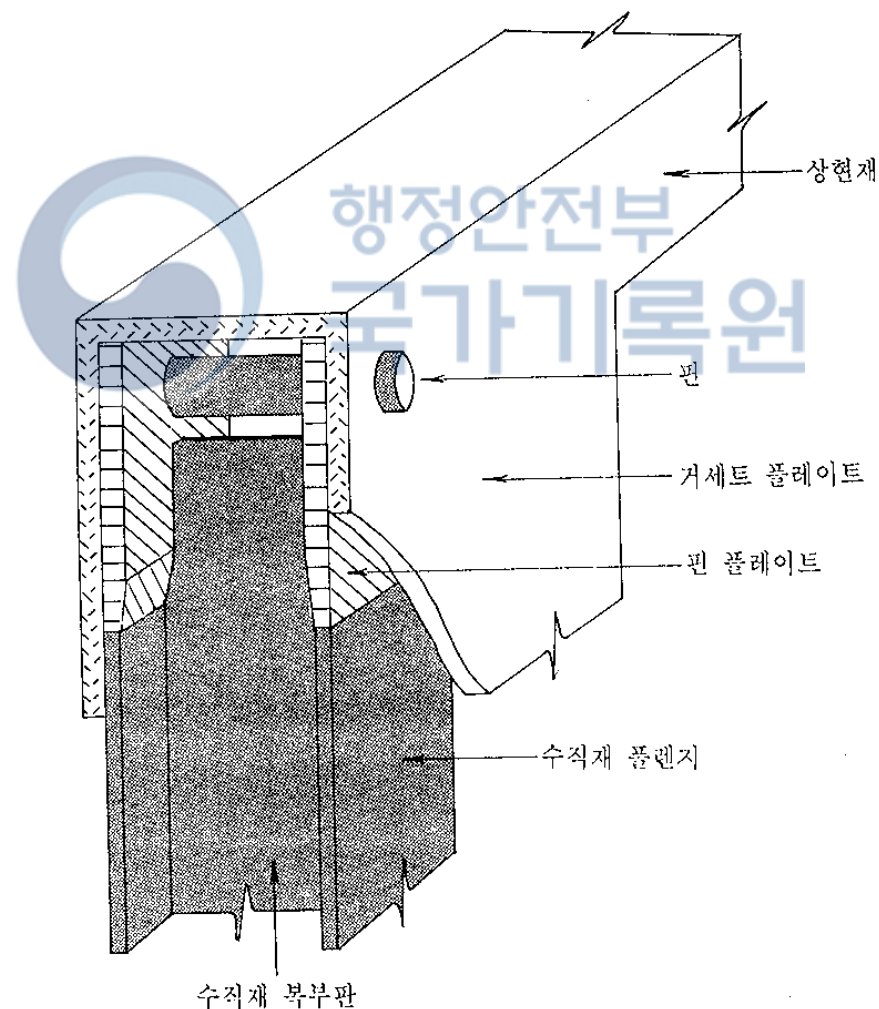
성수대교는 인근 공사장을 출입하는 골재트럭을 비롯한 중차량들의 통행이 빈번하였고, 승용차의 진입은 억제하면서도 중차량의 통행은 별다른 규제가 없었음은 용접결함으로 균열이 발생된 편 수직재의 피로수명을 단축시키는 데 크게 영향을 미쳤다.

직접 붕괴 원인은 결론적으로, 수직재의 용접불량 및 제작결함 같은 부실시공, 주기적인 점검·진단·보수 같은 실제적인 유지관리의 결여와, 중차량 통행과 가로보의 부적절한 보수행위 등의 여러 요인이 복합적으로 작용하여 붕괴가 유발된 것이라 할 수 있다.

이상에서 언급한 바와 같이 여러 요인이 복합적으로 상관작용함으로써 붕괴가 일어난 데다가, 그간의 정확한 교통량데이터가 빈약하고 중차량통행의 데이터가 정확하지 않으며 붕괴시의 붕괴단면의 실제상태, 수직재 균열진전 등에 대한 정확한 데이터를 구할 수 없기 때문에 확정적이며 고도의 이론적인 붕괴원인 분석방법은 적용이 불가능하고 신뢰성이 결여될 수 밖에 없다. 따라서 본 감정단에서는 붕괴원인 분석의 신뢰도를 높이기 위하여 앞의 여러 장에서 상세하게 기술한 바와 같이 가능한 여건 내에서 최대한으로 여러 가지 조사·시험 및 분석을 수행하였다.

여기서는 이러한 조사, 시험, 분석 데이터를 바탕으로 8-2에서는 지배적인 직접 붕괴 원인을 요약하였고, 8-3에 기술한 피로해석 이론과 8-4의 붕

과 모드 분석에 기초하여 8-5절에서는 8-2에서 요약한 붕괴에 영향을 미친 여러 가지 주요 요인들을 독립 또는 복합적으로 고려한 붕괴위험도 분석을 S-N피로해석에 의한 방법으로 정량적으로 분석하였다. 또한, 데이터의 빈곤과 불확실성을 고려하여 공인된 재래적인 피로해석이론과 더불어 자료의 불확실성을 과학적으로 반영하는 최근에 발전된 피로신뢰성 방법도 동시에 적용하여 분석결과의 신뢰도를 높이도록 시도하였다.



(그림 8-2) 게르바 핀 연결 수직재의 상세도

8-2 직접 붕괴원인

8-2-1 개 요

이 장의 기본목적은 성수대교의 붕괴를 유발시킨 직접원인을 피로파괴 이론에 바탕을 두고 정량적으로 분석하는데 있다. 성수대교의 붕괴를 유발시킨 지배적인 직접 붕괴원인의 추정은 이미 앞에서 붕괴 현장조사, 설계 및 시공자료 검토, 비파괴시험, 재료시험 물성시험 결과 등에 바탕을 두고 설계, 시공 및 유지관리 전반에 걸쳐 상세하게 고찰한 바와 같다. 그러나 아래 8-5절의 붕괴위험도 분석결과에서 알 수 있는 바와 같이 기술적인 면의 부실로 인한 성수대교의 직접적인 붕괴는 시공이나 유지 관리 부실 중에 어느 한가지 원인만으로는 발생할 수가 없고, 설계·시공·유지관리 전반에 걸친 여러 부실 요인들이 복합적으로 상관작용하여 발생된 것으로 밝혀졌다. 또한, 수치해석 결과 붕괴의 직접원인으로 작용했을 것으로 추정되는 요인중에 가장 지배적인 직접원인도 시공 및 유지관리의 부실에 있음이 명백하게 드러났다. 분석 결과에 바탕을 두고 직접 붕괴원인은 한마디로 다음과 같이 요약할 수 있다. 즉, 성수대교의 직접 붕괴 원인중에 편 연결 수직재의 용접불량 및 제작결함 같은 시공부실은 최초의 원인을 제공한 것이지만, 반면에 유지관리 부실은 이러한 불량 용접된 수직재의 피로손상을 한번도 점검·보수하지 않고 방치하면서 중차량들의 통행을 규제하지 않음으로써 피로손상이 계속 진행되어 수년 전부터 손상된 수직재의 편작용을 다소 구속하는 가로보의 보수 행위로 인하여 발생한 추가 응력으로 피로수명에 영향을 주어 피로균열이 피로파괴 한계에 도달하는 순간 붕괴를 초래하게 만든 결과적인 원인을 제공한 것으로 볼 수 있다.

여기서는 공인된 피로수명 해석 및 붕괴위험도 분석모형에 바탕을 두고 붕괴에 결정적인 영향을 미친 지배적인 직접 붕괴원인을 정량적으로 밝히기

위하여 직접 붕괴원인에 관련되는 여러 요인들의 붕괴에 미친 상대적인 악영향의 정도를 수치적으로 비교 분석하는데 중점을 두고 있다. 이러한 작업을 체계적으로 수행하기 위하여, 먼저 그간 여러 조사, 시험을 통한 감정과정에서 드러난 붕괴에 영향을 미쳤을 가능성이 높은 요인들을 다시 요약할 필요가 있다. 설계, 시공, 유지관리 전반에 걸쳐 붕괴의 직접원인으로 작용한 요인들 중에 붕괴의 지배적인 직접원인으로 작용했을 가능성이 높은 요인들만을 요약하면 아래와 같다.

8-2-2 시공 부실

성수대교는 붕괴현장의 육안조사, 비파괴시험, 재하시험 등의 감정결과에서 드러난 바와 같이 교량의 전반적인 열화 손상이 심각한 상태에 있음을 고려하면, 열화손상에 미친 유지관리 부실의 영향을 고려하더라도 부실시공의 흔적을 여러 면에서 발견할 수 있다. 그 중에 붕괴를 촉발시킨 단독의 결정적인 원인은 아니지만 최초의 원인을 제공한 것으로 볼 수 있는 수직재의 불량용접이 시공부실의 주된 문제이다. 또한 용접 연결부 상부 핀플레이트의 테이퍼 단면의 1/10 절삭각도를 지키지 않고 몇 배 이상 급테이퍼 단면으로 처리함으로써 응력집중을 어느 정도 야기시킨 점도 부차적인 문제로 들 수 있다. 그 외에도 붕괴에 직접원인과는 무관하지만 가조립을 제대로 하지 않고 실시한 무리한 현장 볼트 접합으로 인한 볼트 접합의 손상탈락 문제, 수평브레이싱이 설계대로 시공되지 않은 문제로 인한 교량의 열화손상을 가속화시킨 문제 등이 일부 지적되고 있지만 경미한 문제이며 직접원인이 아니므로 여기서는 고려하지 않기로 하였다. 그러므로, 부실시공과 관련된 교량붕괴의 직접원인으로서는 수직재 플랜지 단면의 불량용접이 붕괴에 미친 영향만을 위험도 분석의 대상에 포함시켰다.

8-2-3 유지관리 부실

시공부실은 붕괴를 유발시킨 최초의 원초적인 원인을 제공한 것으로 이를 악성종양의 씨앗에 비유하면, 결과적으로 붕괴가 일어나도록 만든 것은 정기적인 점검, 진단, 중차량의 과도한 통행의 규제와 편 수직재와 같은 위험부재의 보수·보강 등을 하지 않은 유지관리의 부재 탓이며, 마치 이는 건강관리를 책임진 전문의가 그 종양이 자라서 사람이 죽을 때까지 몸을 제대로 조기 검진, 치유하지 않고 그대로 방치한 건강관리 부재 때문에 사망케 한 것에 비유할 수 있다.

성수대교는 가설 후 지난 15년간의 공용기간 동안에 일상적인 유지 보수와 상판 표면의 보수, 상판 단차를 야기시킨 손상, 탈락된 가로보의 보수, 신축이음장치의 보수 등 일상 유지보수는 시행해 왔지만, 특히, 수년전부터 수차에 걸쳐 신축 이음부 함몰과 슬래브 단차를 유발시키면서 중트럭에 의한 충격으로 더욱 심하게 손상 탈락되는 가로보의 보수·보강을 위하여 수직재에 가로보를 밀어 올리는 지지대로 브래킷을 편수직재에 직접 용접하여 설치하고 편 수직재 하단에 가로보 버팀재 지지용 H빔 지지대를 사재와 연결시켜 설치하는 등의 보수행위가 있었고, 이것이 수직재에 미치는 악영향에 대한 면밀한 검토도 없이 설치하면서 육안으로도 볼 수 있는 편수직재의 균열은 그대로 방치할 정도로 유지관리면에서 무지하였다. 뿐만 아니라 80년대로 넘어오면서 과적중트럭의 통행이 급증하고 이에 따라 설계하중이 DB/DL18에서 DB/DL24로 증가되었는데도 이 교량에 대한 정밀 안전진단 조차도 한번 제대로 하지 않는 등 교량안전과 관련된 실제적인 유지관리가 전혀 이루어지지 않았음이 명백하게 드러났다. 교량의 생명선인 편수직재에 대한 실제적인 점검·안전진단·균열보수가 없고 편수직재의 구조적 특성을 도외시한 가로보 보수 행위의 결과로 편연결 수직재의 초기 용접결

함이나 피로균열의 성장과 진전을 방지하고 가속화시켜 결과적으로 편수직재의 피로수명을 단축시키게 만들었다. 따라서 여기서는 유지관리상의 다음과 같은 문제점을 붕괴를 촉발시킨 직접원인으로서 붕괴 위험도의 분석에 포함시켰다.

- 게르바 형식 교량에서 붕괴에 가장 취약한 파괴위험부재인 편연결 수직재에 대한 정기적인 점검 및 안전진단을 통한 적절한 균열 보수를 하지 않음으로써, 균열성장 전파를 방지함으로 인한 피로수명 단축 문제
- 중차량의 통행을 규제없이 방치함으로 인한 피로수명의 단축 문제
- 신축이음부 가로보 보강을 위한 보강 지지대용 브래킷을 거셋 플레이트와 수직재 플랜지에 직접 용접 설치하고, 수직재 하단에 가로보 버팀재 지지용 H빔 부재를 사재와 연결시켜 설치한 결과 편 수직재에 유발되는 온도응력과 편 작용의 억제 등으로 인한 추가 2차 응력에 의한 수직재의 피로수명 단축 문제

붕괴에 결정적인 영향을 미친 상술한 유지관리 부실문제 외에도 신축이음부의 유지관리 부실로 인하여 하부로 우수, 염화칼슘, 유해 이물질 등의 유입에 의한 신축이음부 아래 편 연결부 주위의 트러스 부재와 가로보 및 세로보의 부식·손상 등과, 편 둘레의 부식, 거셋 플레이트와 플랜지 사이의 부식 등으로 편작용을 제대로 못하도록 수직재를 고정시킨 결과 유발되는 2차응력의 증가문제도 일부 지적되고 있지만, 그 영향이 미비하거나 확실하지 않은 점도 있고 정량화가 곤란하거나 직접원인으로 볼 수 없는 점도 있어 이들의 개별적인 영향은 분석에서는 제외시켰다.

8-2-4 설계 부실

성수대교는 교량의 형식면에서 게르바 연속트러스교로서 구조여용성 측면에서 여용성이 전혀 없는 형식으로 붕괴의 사전예고가 불가능하여 교량 안전도나 붕괴에 가장 취약한 교량형식으로서 70년대 이후에 선진국에서는 더 이상 사용하지 않는 교량형식이다. 그러면서도, 당시로는 최초의 특수형식의 장대 트러스교량이기 때문에 특히 시공성을 고려한 정교한 설계가 요구되지만, 성수대교의 설계는 앞의 5장에서 기술한 바와 같이 구조설계도서의 검토 결과 당시 DL-18 설계하중으로는 구조물의 단면이나 상세설계 측면에서 근본적인 과오는 없는 것으로 판명되었다. 그렇지만 최적설계의 관점에서 보면, 여러면에서 당시의 시공기술을 제대로 고려하지 않은 설계로서 시공성과 상세설계면에서 부적절하며 조잡한 설계라 할 수 있다. 특히, 이 교량의 생명선이라 할 수 있는 게르바 편연결 수직재 부위의 상세설계는 용접이음부가 거세트판 내에 있어 용접의 불편과 사후점검의 어려움 등 다소 부적절한 부분이 있다. 그 외에도 당시 우리 구조설계 기술로는 어쩔 수 없었던 것이지만 구조설계시에 3-D FEM 해석을 하지 않아 풍하중, 편축재하 등에 의한 2차응력 효과를 제대로 고려할 수 없었고 당시 피로설계 규준이 설계시방서에 없는 관계로 수직재에 대한 피로설계 검토를 하지 않는 것이 흠이라고 지적할 수 있다. 또한, 특별 시방서와 설계도면상에 수직재의 용접 및 검사에 대한 상세한 시방 기준이나 유지관리용 배수로나 접근시설 등에 대한 고려가 전혀 되어 있지 않은 점들을 지적할 수 있지만, 당시 우리 설계기술 이상의 문제이고 붕괴의 직접원인에 관계되는 것은 아니라고 본다.

따라서, 설계 부실은 붕괴의 직접적인 주요 원인으로는 고려하지 않는 것이 바람직하다고 본다. 그러나 부적절한 편수직재의 상세설계로 인한 플랜지 국부응력집중과 2차응력의 영향과 가로보, 수직·수평 브레이싱 부재 등 2차부재의 부적절한 횡강성 설계등의 복합적인 요인으로 인한 과도한 2차응력이 붕괴에 미친 영향은 위험도 분석에서 간략하게 검토될 것이다.

8-3 붕괴 위험도 분석 이론

8-3-1 개 설

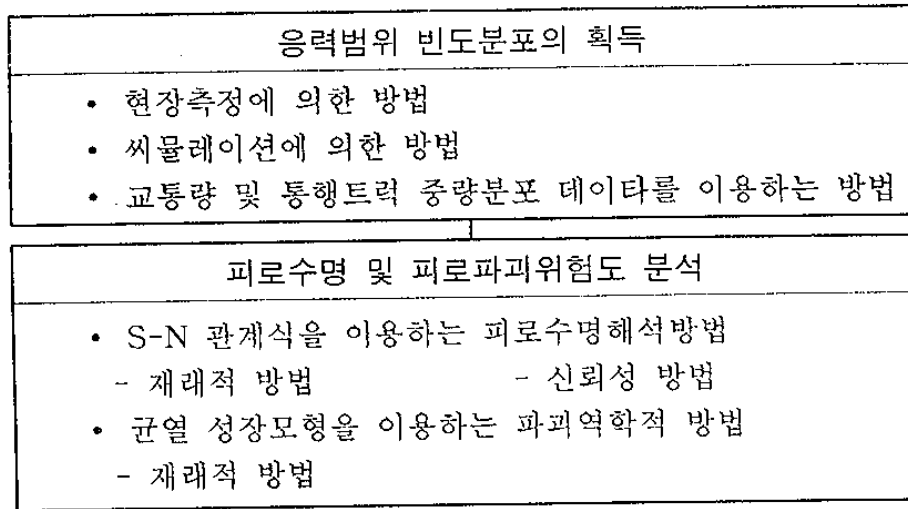
성수대교의 붕괴는 앞서서도 수차에 걸쳐 언급한 바와 같이 게르바 편연 결부 수직재 상부 핀플레이트와의 용접부의 용접시공 부실로 인한 초기결함이나 초기취성균열 등이 유지 점검을 통하여 발견 보수되지 않고 방치됨으로써 반복 트럭하중에 의한 피로파괴 균열의 확대 진전으로 수직재가 한계 상태에 도달하는 순간 극한강도파괴를 일으키며 붕괴되었음이 자명하다. 그러므로 붕괴원인의 분석은 피로파괴에 대한 정확한 피로수명 및 피로파괴 위험도 분석을 통해서만 가능하다. 따라서, 여기서는 앞 절에서 기술한 여러 요인에 대한 해석 조건별로 피로수명 해석과 피로파괴 위험도해석을 공인된 이론과 방법에 의해 수행할 것이다. 해석이론은 크게 대별하면 Miner 누적손상법칙과 S-N 피로특성을 기본으로 하는 피로수명 해석이론과 선형탄성 파괴역학적 균열성장 이론인 Paris Power 법칙에 기초한 파괴역학적 피로파괴해석 이론으로 구분할 수 있다. 이러한 두 가지 해석이론은 재래적인 피로 해석의 기본 방법으로 사용되어 왔지만 최근에는 피로해석 관련 데이터, 특히 피로응력범위의 분포 데이터의 부족과 이로 인한 불확실성이 클 뿐 아니라 피로특성 데이터의 불확실성도 크기 때문에 이러한 불확실성을 합리적이며 과학적으로 처리하는 확률통계적 방법인 피로신뢰성(Fatigue Reliability)이론에 의한 확률적인 피로파괴 해석이론이 선진국에서는 보다 과학적이며 합리적인 분석방법으로 사용되고 있다. 이러한 해석이론은 매우 실용적인 방법인 S-N 피로 신뢰성이론과 파괴역학적 피로신뢰성이론으로 구분할 수 있다. 여기서는 재래적인 두 가지 해석이론 외에 실용적인 피로신뢰성 이론에 의한 피로파괴에 의한 붕괴 위험도 분석방법도 함께 적용하여 보다 신뢰도가 높은 해석 결과를 얻도록 노력하였다.

8-3-2 S-N 피로 해석 이론

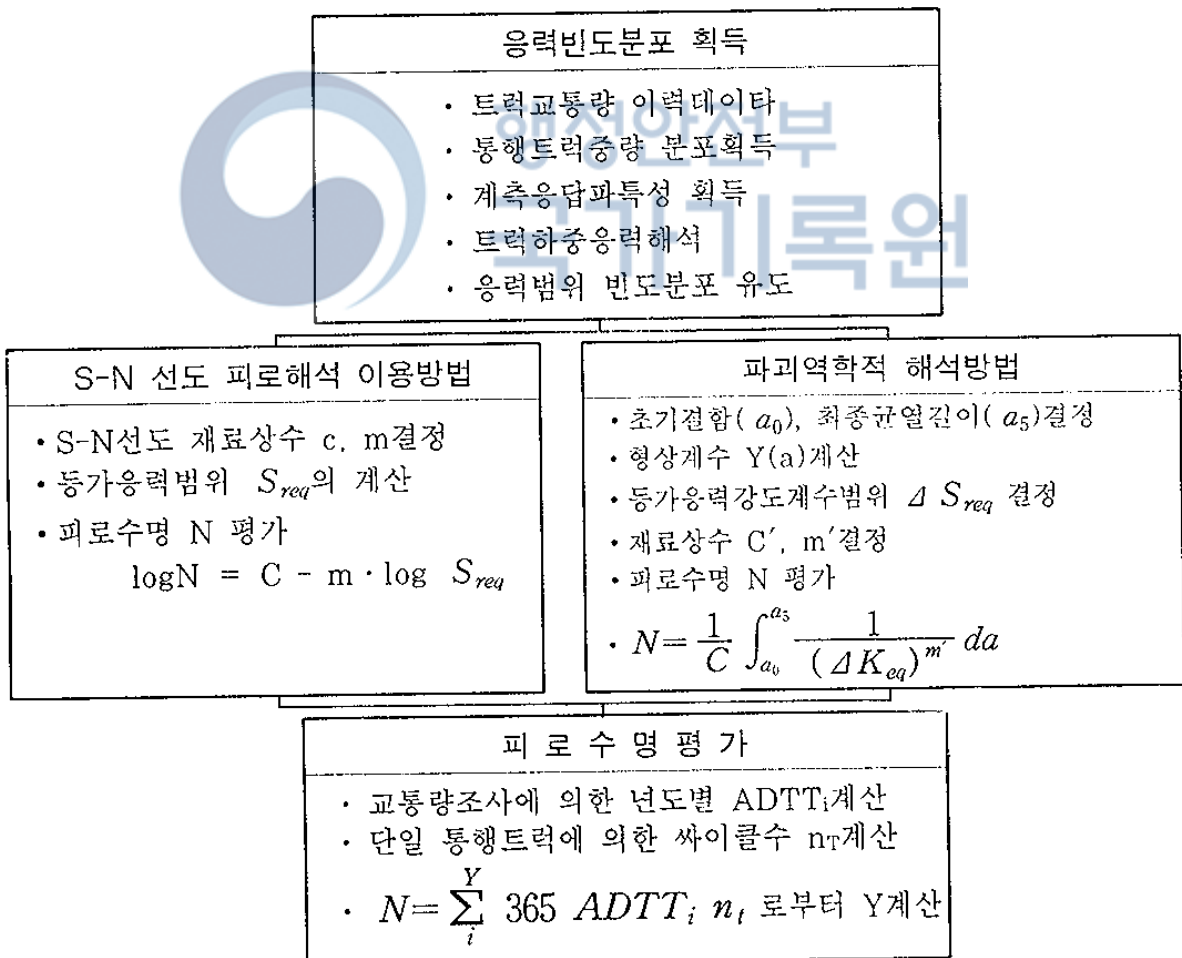
피로수명 해석이나 피로파괴위험도의 분석평가는 크게 응력범위빈도분포의 획득과 피로해석이론에 바탕을 둔 분석모형에 의한 수치해석부분으로 나누어서 생각할 수 있다. 강교량의 피로취약 상세부위에 대한 성공적인 피로 해석을 위해서는 해당부위의 통행트럭으로 인한 지속적인 변동응력파에 대한 사이클계산(Cycle Counting)과 주요트럭의 구성빈도, 일일평균 트럭교통량 ADTT(Average Daily Truck Traffic)같은 교량의 통행트럭 하중이력 등의 자료로부터 응력범위 빈도분포의 작성이 결정적으로 중요한 자료이다. 또한, 피로해석대상 상세부위에 대한 피로시험 및 적절한 분석방법에 의한 S-N피로응답특성, 응력강도계수, 파괴인성특성 등의 피로특성 데이터의 획득이 전제되어야 한다.

(그림 8-2)에서 보는 바와 같이 응력범위 빈도분포는 장기간 현장측정에 의한 방법 및 시뮬레이션에 의한 방법이 보다 엄밀한 응력범위 빈도분포 획득 방법 이지만, 본 과업에서는 이미 붕괴된 구간에 대해서 이 두 방법은 사용하지 못하므로 교통량 데이터 및 통행트럭 중량분포 데이터를 기초로 하고 정·동적 재하시험에 의해 구한 교량의 실응답특성을 고려하여 근사적으로 응력범위빈도분포를 획득하는 방법을 채택할 수밖에 없었다. (그림 8-2)에 나타낸 바와 같이 이와 같이 근사적인 응력범위 빈도분포가 구해지면 이에 따른 피로수명 및 피로파괴 위험도분석은 앞절에서 언급한 바와 같이 S-N 피로곡선을 이용하는 피로수명 해석방법과 균열성장모형을 이용하는 파괴역학적 방법에 대하여 각각 재래적인 방법과 신뢰성방법을 공히 적용하여 비교하였다.

각 절차에 대한 구체적 방법 및 해석 절차에 관한 요점만을 아래에 요약 서술하였다.



a) 강교의 피로수명 및 피로파괴 위험도 분석 절차



b) 피로수명평가 흐름도

(그림 8-3) 피로수명 평가 및 피로파괴 위험도 분석 절차

가. S-N 피로 관계식 (S-N 선도)

먼저, 응력범위 S_r 와 반복회수 N 은 피로상세부위별로 상진폭 응력범위 피로시험 통계적 데이터에 바탕을 두고 구한 Log Scale상 S-N선도로부터 구한 S-N 피로특성으로부터 다음과 같은 관계를 가진다.

$$N \cdot S_r^m = A \quad (8.1)$$

양변에 Log를 취하여 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$\log N = C - m \cdot \log S \quad (8.2)$$

이때, $C = \log A$ 로 S-N선도의 절편(Intercept)상수
이 식으로부터 상진폭응력 S 에 대응하는 피로수명을 구할 수 있게 된다.

나. Miner 누적 손상 법칙

여러수준의 상이한 변동진폭 응력범위의 실제 작용반복횟수에 따라 누적되는 피로 손상의 선형누적가정에 기초를 둔 Miner누적손상법칙이 아직도 실용적인 S-N 피로손상해석에서 기본개념으로 사용되고 있다. Miner 법칙에 의하면 $n_1, n_2, \dots, n_i$ 를 각 응력범위에서의 반복횟수라고 하고 $n_1, n_2, \dots, n_i$ 를 S-N 피로선도로부터 구한 각 응력범위 수준에서의 피로수명(파괴가 일어날 때까지의 응력반복회수)이라고 할 때 피로손상의 선형 누적 가정에 의해

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{j=1}^{i=k} \frac{n_j}{N_j} = 1 \quad (8.3)$$

일 때 피로파괴가 일어난다고 가정된다.

다. 응력범위 빈도분포

강교량의 용접부에 발생하는 국부응력은 용접부의 형상, 통행차량의 크기, 진동특성 등에 따라 달라지는 변동응력으로서, 이들의 빈도분포를 획득하는 것이 피로수명 해석의 기본전제가 된다. 응력범위 빈도분포를 얻는 방법에는 앞에서 언급한 바와 같이 크게 다음과 같은 세 가지가 있을 수 있지만 본 과업에서는 첫번째 장기계측방법은 본 교량과 같이 이미 붕괴된 구간에 대해서는 구할 수 없고, 두번째 씨물레이션방법은 교통량 데이터의 빈곤과 해석의 어려움으로 성공적으로 적용할 수 없기 때문에 근사적이지만, 세번째 트럭중량 빈도분포를 이용하는 방법을 통해 응력범위 빈도분포를 획득하도록 하였다. 이 방법에서는 교통량데이터를 통해 ADTT를 분석하고 통행트럭 중량 빈도분포를 구한 다음 실제측결과에 의한 실응답과 특성을 고려하고, 주요 트럭하중에 의한 응력해석 결과를 바탕으로 수직재의 응력범위 빈도분포를 획득한다.

라. 등가응력범위

대부분의 피로해석이론에서는 특정 상세부위에 대한 변동응력의 영향을 근사적이지만 실용적으로 처리하기 위하여 등가응력범위의 개념을 사용하고 있다. 등가응력범위는 변동응력의 효과(반복횟수, 응력범위)에 의한 피로손상과 동일 반복횟수로 동일한 피로손상을 야기하는 등가적인 일정상진폭 응력범위를 말하는데 설계하중에 의해서 부재에 발생하는 응력범위 S_{rd} 가 계산되면 등가응력범위는 아래에서 기술한 S-N 피로관계식과 Miner 손상법칙으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} S_{req} &= \left[\sum \gamma_i (\varphi_i \alpha S_{rd})^m \right]^{1/m} \\ &= \left[\sum \gamma_i \varphi_i^m \right]^{1/m} \alpha S_{rd} \\ &= \rho \alpha S_{rd} \end{aligned} \quad (8-4)$$

여기서, S_{rd} = 설계하중에 의한 계산 응력범위

$\gamma_i = i$ 번째 응력범위의 발생빈도($=n_i/\sum N_i$)

$\phi_i = S_{rd}$ 에 대한 S_i 의 비($=S_i/S_{rd}$)

$\alpha =$ 계산응력과 실측응력의 비(응답비 $\alpha = S_r^m/S_{rc}$)

$m =$ S-N 선도의 기울기

$$\rho = \left[\sum \gamma_i \phi_i^m \right]^{1/m}$$

마. S-N 피로수명 평가

S-N 피로해석에 의한 방법은 근본적으로 Miner의 누적손상법칙과 S-N피로곡선에 기초하고 있는 방법으로서, 획득된 응력범위 빈도분포로부터 등가피로응력범위를 계산하여 피로수명 및 피로파괴위험도를 평가하는 방법이다.

피로수명을 평가하는 재래적인 방법 중 근사적이지만 실용적이기 때문에 일반적으로 사용되는 방법은 Miner의 누적손상법칙에 바탕을 둔 등가응력범위와 피로수명의 S-N 관계에 기초한 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$\log N = C - m \log S_{req} \quad (8-5)$$

여기서, $N =$ 피로수명

$S_{req} =$ 등가응력범위

$C, m =$ S-N 관계식의 절편과 기울기

이때, 등가응력범위 S_{req} 는 응력범위빈도분포를 바탕으로 구한 응력범위 발생빈도 γ_i , 실제응력에 대한 응력범위비 ϕ_i 와 실제측데이터로부터 구한 실응답비 α 를 이용하여 식(8-1)로부터 구할 수 있다.

년도로 환산한 피로년한 Y 는 다음 식으로부터 수치적으로 구한다.

$$N = \sum_i^Y 365 ADTT_i n_T$$

또는, 평균 ADTT를 이용하는 경우

$$Y = \frac{N}{365 \cdot ADTT \cdot n_T}$$

여기서 $ADTT_i$ 는 년도별 트럭통행 교통량

n_T 는 단일 트럭통행에 의한 반복횟수, 일반교량에서

통상 근사적으로 $n_T = 1$ 로 취함.

8-3-4 피로신뢰성에 기초한 피로파괴위험도 분석

전술한 S-N피로수명 해석방법은 주어진 응력범위 빈도분포 및 S-N피로 파괴특성으로부터 확정적인 피로수명을 구하게 된다. 그러나, 본 성수대교의 경우에는 실교통량 이력 데이터의 불확실성으로 인하여 계산된 피로수명의 신뢰도는 매우 낮다. 그러므로, 확정적이며 단정적인 평가방법보다는 모든 데이터의 불확실성을 합리적으로 반영하는 선진국의 한계상태 설계법에서 기초이론으로 최근에 사용하고 있는 과학적인 해석방법인 피로신뢰성 방법에 의한 피로파괴 위험도의 확률적 표현이 더 바람직한 방법이다. 여기서는 피로신뢰성 해석에서 가장 실용적인 소위 2차모멘트 신뢰성지수(β) 해석방법과 좀더 합리적인 피로파괴확률(P_F)의 해석방법을 공히 사용하였다. 성수대교의 경우 교량의 붕괴는 수직재의 피로파괴가 붕괴메커니즘 한계상태에 도달하는 순간 붕괴되었기 때문에 교량붕괴위험도의 척도로는 피로파괴확률(P_F)을 사용함이 바람직함을 알 수 있다.

가. 피로신뢰성지수

Albrecht[1983]는 신뢰성지수 β 를 사용하여 2차 모멘트법에 의한 피로 신뢰성의 평가방법을 제안하고 있다. 이때 피로파괴위험도인 파괴확률

은 표준정규분포 $\Phi(\cdot)$ 로부터 $P_F = \Phi(-\beta)$ 로 구한다. 이 방법은 S-N 피로곡선에 근거하여 피로신뢰성지수 β 에 대응하는 피로수명 반복회수의 항으로도 표현할 수 있다. 피로신뢰성지수 β 는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = \frac{\log N - \log N_d}{\sqrt{(s_R)^2 + (ms'_Q)^2}} \quad (8-8)$$

여기서 $N_d = \beta$ 에 대응하는 피로수명

N = 평균수명

β = 신뢰성지수

s_R, s'_Q = 피로수명과 하중작용의 표준편차

$s'_Q = \text{slog } \rho$

m = S-N 관계식의 기울기

나. 피로파괴확률

Ang-Munse[1975] 등은 피로수명 N 이 Weibull 분포를 갖는다고 가정하여 피로신뢰도 $R_N(n)$ 을 다음과 같이 나타내었다.

$$R_N(n) = \exp \left[- \left(\frac{n}{E(N)} \Gamma(1 + \Omega_N^{1.08}) \Omega_N^{1.08} \right) \right] \quad (8-9)$$

여기서, n = 피로반복횟수 (= $365 \times \text{ADTT} \times \text{실파괴년한}$)

$E(N)$ = 평균기대 피로반복횟수

Γ = Gamma Function

$\Omega_N = 0.74$ (Ang-Munse 제안값)

$$\therefore \Omega_N^{1.08} = 0.7224, \quad \Omega_N^{-1.08} = 1.3843$$

$$\therefore \Gamma(1 + \Omega_N^{1.08}) = \Gamma(1.7224) = 0.9131$$

따라서, 피로파괴확률 즉, 파괴위험도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_F = 1 - R_N(n) \quad (8-10)$$

2) LEFM에 의한 피로수명 및 피로위험도해석 방법

(1) 재래적인 방법

LEFM(Linear Elastic Fracture Method)방법은 앞서 설명한 바와 같이 Paris의 균열성장모형에 기초하여 용접부의 피로파괴수명을 추정하는 방법이다. 균열은 I. 정지상태균열, II. 안정성장단계, III. 불안정파단의 과정을 거치게 되는데 이때 제II단계는 Paris의 방정식에 의해서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = C' (\Delta K)^{m'} \quad (8-13)$$

여기서, C' , m' = 균열성장모형의 절편과 기울기

ΔK = 응력확대계수범위

a = 균열길이

N = 피로수명

한편, 응력확대계수범위 $\Delta K(K_{max} - K_{min})$ 는 실제 교량과 같이 변동 응력을 받는 경우에는 다음과 같이 등가응력확대계수범위 ΔK_{eq} 로 치환하여야 한다.

$$\Delta K_{eq} = Y(a) S_{req} \sqrt{\pi a} \quad (8-14)$$

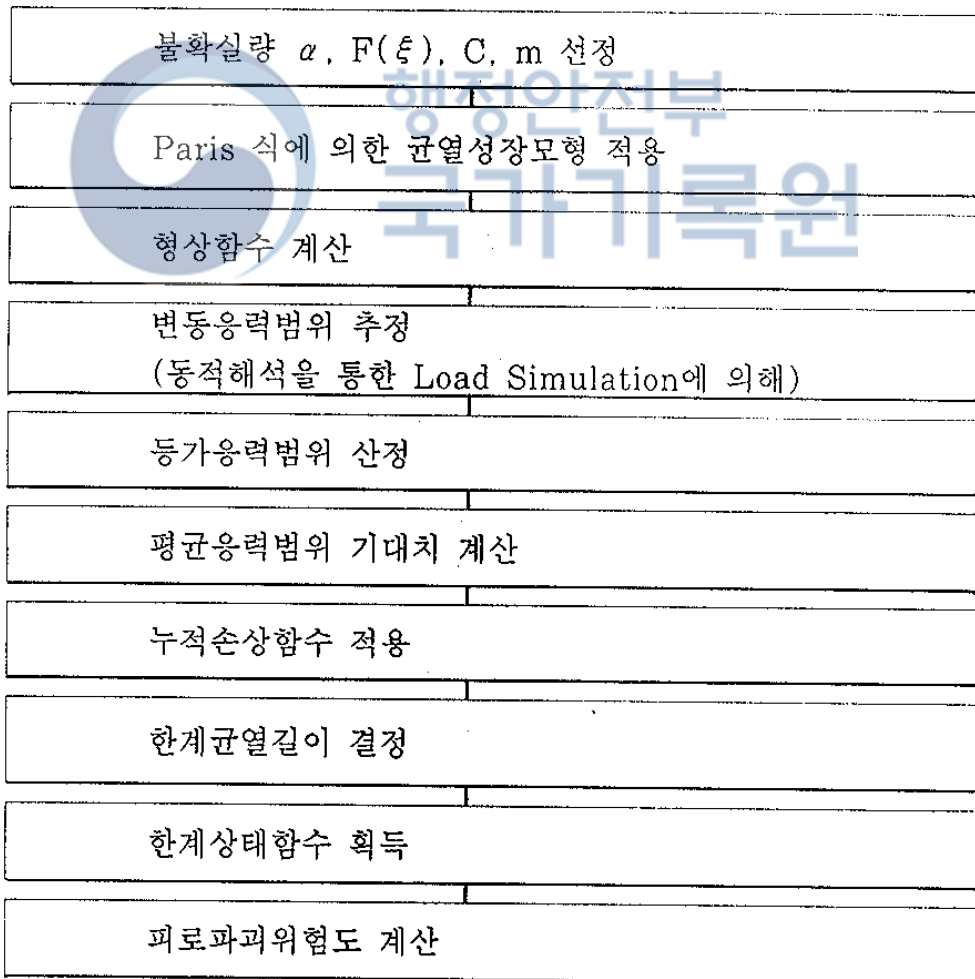
여기서, $Y(a)$ 는 형상계수, S_{req} 는 등가응력범위

따라서 피로수명 N 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N = \frac{1}{C'} \int_{a_0}^{a_s} \frac{1}{(\Delta K_{eq})^{m'}} da \quad (8-15)$$

(2) 신뢰성 방법

전술한 파괴역학적 방법에 의한 피로해석에 대한 접근방법은 균열성장모형 이론에 기초를 두고 응력범위에 따른 초기균열에서부터 한계균열에 이르는 균열성장의 함수형태로부터 한계상태함수를 획득하는 것이다. 즉, S-N 선도를 이용하는 방법에서는 불확실량에 균열길이를 고려할 수 없는 반면, LEFM방법에서는 이를 포함할 수 있는 것이 가장 큰 차이점이다. 다음에 LEFM에 의한 해석의 흐름도를 (그림 8-6)에 도시하였다. 상세한 내용은 지나치게 전문적인 이론이므로 생략하였다.



(그림 8-4) LEFM에 의한 해석의 흐름도

다. 해석을 위한 소요 데이터

본 성수대교의 파단된 수직재에 대한 피로수명과 붕괴위험도를 합리적으로 해석하려면 위에서 요약한 S-N 피로해석 방법과 균열성장모형에 의한 파괴역학적 방법 각각에 대하여 재래적 또는 신뢰성 방법을 적용하여 해석하는 것이 바람직하다. 그러나 이와 같이 공인되고 비교적 엄밀한 이론적인 방법에 의해 신뢰도가 높은 피로해석을 수행하기 위해서는 다음에 열거한 자료, 데이터 및 실험 결과가 필요하다. 현재 시험이 진행중에 있는 수직재의 S-N피로시험 데이터를 제외하고는 거의 대부분의 자료가 가능하다.

• 응력빈도분포(수직재) - 응력빈도분포 - 등가응력빈도분포	행정안전부 국가기록원
• 수직재 S-N 피로시험데이터 - S-N 관계식의 절편과 기울기 : C, m - 피로한계(Fatigue Limit)	
• 균열성장거동 - 안정균열성장 단계의 절편과 기울기 : C', m' - 불안정 균열 파단을 일으키는 파괴 인성치 : KIC - 초기균열길이 및 최종균열길이 : a_0, a_f	
• 교통량 및 과적차량 통행자료 - 과적차량 형식별 축중, 축거, 통행량 - 성수대교 교량가설시부터 ADTT의 변화 - 15년간의 피로반복회수	
• 기타 필요한 데이터 - 수직재 비파괴검사 결과 - 파면해석 결과	

8-4 붕괴Mode 해석(Failure Mode Analysis)

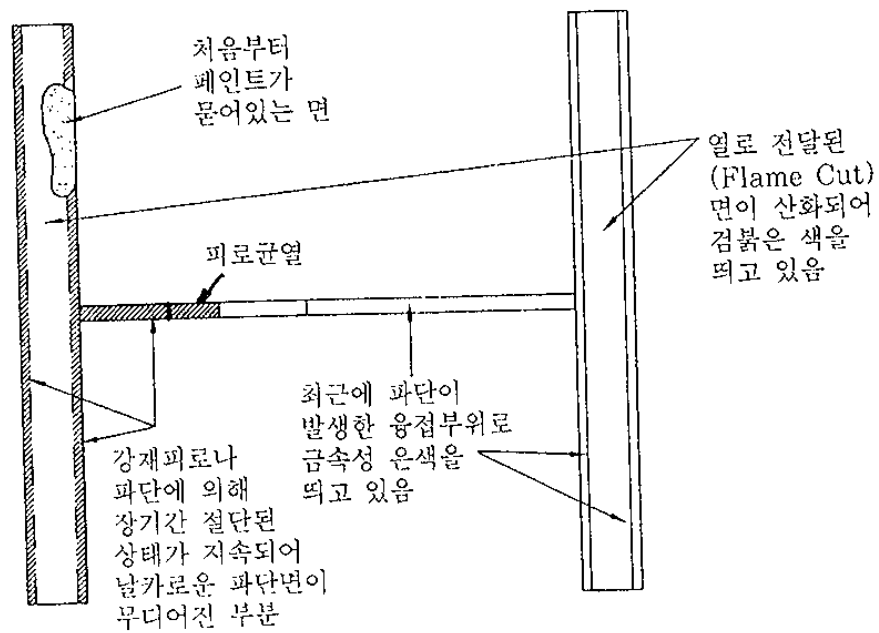
8-4-1 파단면 관찰과 균열의 위치

성수대교의 붕괴된 구간 북측에는 세개의 수직재가 똑같은 위치, 즉 플랜지의 두께가 50mm에서 18mm로 변하는 지점의 부분용입 홈용접된 곳에서 파단이 되어 있었다. 사고 직후 상부구조에 매달려 있던 수직부재의 윗부분에 대한 육안검사를 통하여 18mm 용접플랜지의 전길이(500mm)에 걸쳐 가운데 10mm에 열을 가해 절단한 면(Flame Cut Surface)으로 오랜 기간 산화되어 검붉은 색을 띤 것이 확인되었고 나머지 8mm용접부위는 대부분 은색을 띤 파단면으로 많은 전단변형을 일으키며 파단된 것을 확인하였다.

또한 Web Plate는 순간적인 편심의 영향으로 균열선이 불규칙한 선을 이루었지만 많은 전단변형을 일으키며 순간적으로 파단된 것이 확인되었다. 그러나 중앙의 수직부재에는 파단된 플랜지면에 안쪽으로 약 8cm길이로 푸른색의 페인트가 묻어있는 것이 관찰되었다(그림 8-5 참조). 이것은 교량의 公用中에 생긴 피로균열이 성장하며 그 틈새로 유지관리를 위한 도색작업으로 페인트가 침투되었거나, 公用中에 한번도 도색작업을 안했다면 시공시부터 존재해 있던 균열틈새로 페인트가 침투한 것으로, 어떤 경우이거나 간에, 상당한 길이의 균열이 플랜지에 存在해 있었음을 증명한다. 새로 생긴 파단면은 금속면 특유의 은색을 띠고 있었으며 강재의 두께가 얇고 伸展性이 큰 부재였기 때문에 경사진 파단면(Slant Fracture Surface)으로 북부판과 플랜지 용접부위에 가는선으로 나타나 있다. 이 중앙 수직부재의 플랜지중 페인트가 묻어있던 한쪽 플랜지는 두줄의 용접선이 오래전에 파단되어 있었기 때문에 은색이어야 할 파단면이 산화되어 있었다. 이것으로 미루어 보아 중앙 수직재가 제일 먼저 두 부분으로 분리되어 있었고 다음에 동쪽 수직재가 파단되면서 현수지간은 완전히 붕괴되었다.



강북쪽 중앙 수직재의 파단면사진(94.11.2 촬영)



(그림 8-5) 중앙 수직부재 파단면 사진과 사진설명

8-4-2 파단모드 (Failure Mode)의 가정

이러한 파단면의 관찰과 파손된 여러가지 상태를 감안하여 보면 성수대교 수직부재중 중앙의 수직부재가 파단된 경로는 다음과 같이 가정해 볼 수 있다.

- ① 부분용입 홈 이음용접(Lack of Fusion Groove Weld)으로 인하여 양측 플랜지는 중앙에 평균 폭 10mm 길이 480mm의 용입이 안된 부분이 내재균열 (Embedded Crack or Built-in Crack)로 존재해 있었으나, 작용한 수직력 224.9Ton (고정하중 + DL-18 활하중 + 충격하중)에 비해 순단면적은 129cm² (부분용접으로 용입이 안된 부분은 제외)로서 최대평균응력이 1744kg/cm² (171 MPa)이기 때문에 용접재의 항복강도나 인장강도가 모재보다 일반적으로 높은 것을 감안하면 아직 항복이 일어나지 않았다고 할 수 있다(Embedded Initial Crack).
- ② 시공 당시부터 파단면에 페인트가 묻어 있도록 (약 80mm) 표면에서부터 균열이 있었거나, 피로현상으로 내부의 내재균열이 커져서 일정한 균열의 크기가 되었을때 재료의 파단인성치를 초과하게 되자 한쪽 플랜지가 먼저 파단이 되었고 (Flange Fracture),
- ③ 다른 한쪽 Flange와 복부판이 함께 수직력에 저항할 때 아직도 순단면적은 88.2cm²이므로 편심을 받기는 하지만 평균인장응력은 다음과 같다.

$$\sigma_t = \frac{224.9(\text{ton})}{88.2(\text{cm}^2)} = 2.551 \text{ ton/cm}^2 = 250.2 \text{ MPa}$$

제4장에서 수행한 강재 인장 시험에 의하면 모재의 항복강도는 294MPa이고 극한 인장강도는 451 MPa이므로 용접재의 인장강도가 모재보다 높은 것을 감안하면 아직도 항복이 일어나지는 않았기 때문에 복부판 Fillet 용

접부위에서부터 균열이 안쪽으로 성장하고 동시에 다른쪽 플랜지에서도 피로균열이 얼마만큼 성장하다가 (Web and Flange Fatigue Cracking),

- ④ 피로 균열 성장으로 한쪽 플랜지의 대부분이 없어지고 복부판도 피로에 의한 균열성장으로 약 6cm 잠식당하여 있을때 전 인장력 225 Ton 이 작용하게 되자 급속한 파단이 발생하여 수직재는 급속히 두 부분으로 분리되었다(Fast Fracture Failure).

앞의 제4장에서 언급한 각종 재료시험과 피로실험의 결과를 이용하여 이러한 붕괴모드의 가정이 타당한가를 다음과 같이 검토해 볼 수 있다.

8-4-3 강재의 파괴인성(Fracture Toughness)과 기계적 성질

제4장에서 상온에서 3점 굽힘 시험(3Point Slow Bend Specimen)으로 구한 K_{Ic} 의 값이 시편두께의 요구조건은 충족시키지 못하지만 적절히 보정을 하면 귀중한 판단자료가 될 수 있다. 시편두께 46mm로 구한 K_c 의 값이 $62.2 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$ 이고 항복강도(σ_{ys})가 294 MPa 이므로 Irwin의 경험식을 이용하여 반복계산을 통해 구하면 K_{Ic} 의 값이 약 $50 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$ 인 것을 알 수 있다.

여기서 Irwin의 경험식은 다음과 같다.

$$K_{Ic} = \frac{K_c}{\sqrt{1+1.4\beta_{Ic}^2}} \quad (8.12)$$

$$\beta_{Ic} = \frac{1}{t} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (8.13)$$

이 값은 상온에서 Plane Strain Condition을 만족시키는 최소 파괴 인성치로서 재료의 성질과 시험온도만이 변수이다. 따라서, 18mm 두께의 플랜지 강재의 파괴인성치(Fracture Toughness)는 다음과 같다.

$$\beta_{IC} = \frac{1}{t} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 = \frac{1}{0.018} \left(\frac{50}{294} \right)^2 = 1.607$$

$$\begin{aligned} \therefore K_c &= K_{IC} \sqrt{1 + 1.4 \beta_{IC}^2} \\ &= (50) \sqrt{1 + 1.4(1.607)^2} = \underline{107.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}} \end{aligned}$$

그리고 10mm 두께의 복부판 강재의 파괴인성치는 아래와 같으며 강재두께와 사용된 강재가 연강임을 고려할때 合理的인 값으로 사료된다.

$$\beta_{IC} = \frac{1}{0.010} \left(\frac{50}{294} \right)^2 = 2.892$$

$$\therefore K_c = (50) \sqrt{1 + 1.4(2.892)^2} = \underline{178.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}$$

파단면 관찰과 피로실험을 통하여 최후 균열의 길이(a_f)가 상당히 큰 값임을 고려할 때 위의 파괴인성치는 크게 틀린 값이라고 할 수 없다.

8-4-4 붕괴 모드 해석 (Failure Mode Analysis)

용접부실로 인한 부분용입 때문에 내재균열(Embedded Crack)이 존재해 있고 일부에는 페인트가 내재균열면까지 침투되어 있는 균열의 모양은 매우 복잡하기 때문에 이러한 부재의 응력확대계수(Stress Intensity Factor)는 산정이 매우 어렵다. 또한 균열이 플랜지에서는 용접면을 따라 발생하였기 때문에 용접재료의 물성치를 알아야 하나 시험편을 만들 수 없어 용접의 물성치를 구할 수 없었다. 그러나 일반적으로 용접재의 성질은 모재의 성질과 같거나 더 우수하다고 가정할 수 있다.

- 1) 플랜지의 응력확대계수는 정확한 값을 구하기가 매우 어렵기 때문에 다음과 같이 세 가지로 균열의 크기와 형상을 가정하면 Upper Bound와 Lower Bound를 구할 수 있다.

- ① 용입부족으로 플랜지에 내재된 균열(Built-in Crack)을 매우 긴 타원형 균열

(Very long Elliptical Crack)로 간주하면 $K = Y\sigma \sqrt{\frac{a}{Q}}$ 이다.

여기서 $\frac{a}{2C} = \frac{5}{480} \approx 0.0$ 이므로 $Q \approx 0.775$ 이고 $Y = \sqrt{\pi}$ 이다.

순단면적에 대한 평균응력은 $\sigma = 1744 \text{ kg/cm}^2 = 171 \text{ MPa}$ 이므로 K_1 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_1 &= \sqrt{\pi} (171) \sqrt{\frac{0.005}{0.775}} \\ &= 24.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K_{IC} \approx 107 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \end{aligned}$$

K_1 값이 플랜지의 파괴 인성치인 $107 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 보다 작기 때문에 용입부족으로 생긴 내재된 균열로 인해 불안정한 균열 즉 플랜지의 급격한 파단(Unstable Fast Fracture)은 생기지 않는다.

- ② 파면 육안검사시 확인되었던 것과 같이 위와 같은 내재된 균열에 약 80mm 길이의 균열로 페인트가 침투해 있었다면 이 안쪽면의 균열은 플랜지의 폭 500mm중에서 균열의 길이가 80mm인 한편이 터진 Edge Crack으로

$$K = Y\sigma \sqrt{a} \text{에서}$$

$$\frac{a}{W} = \frac{80}{500} = 0.16 \text{이므로 } Y = 2.4 \text{이다. 순단면적에 대한 평균응력은}$$

$\sigma = 171 \text{ MPa}$ 이므로, K_1 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_1 &= (2.4)(171)\sqrt{0.08} \\ &= 116 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \end{aligned}$$

© 이 페인트가 침투한 80mm 길이는 또한 플랜지 강재 두께 18mm에서 14mm 두께방향 Edge Crack이라고 간주하면 균열길이 $a=14\text{mm}$ 이고 폭 $W=18\text{mm}$ 이므로

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{b}\right) \text{에서 } \frac{a}{W} = 0.778 \text{ 일때}$$

$$F\left(\frac{a}{b}\right) = \frac{1.07}{(1-0.778)^{\frac{3}{2}}} = 10.23 \text{ 이며 } K_1 \text{은 다음과 같다.}$$

$$\begin{aligned} K_1 &= (171)\sqrt{3.14(0.014)}(10.23) \\ &= 366.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \end{aligned}$$

이 80mm를 제외한 나머지 플랜지는 폭 18mm에 생긴 균열길이 $2a = 10\text{mm}$ 인 Center Through Crack이라고 가정하면 $K=Y\sigma\sqrt{a}$ 에서,
 $\frac{2a}{w} = \frac{10}{18} = 0.556$ 일때 $Y=2.22$ 이므로 K_1 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_1 &= (2.22)(171.0)\sqrt{0.005} \\ &= 26.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \end{aligned}$$

가중평균을 구하면 다음과 같다.

$$K_{1 \text{ avg}} = \frac{366.8 \times 80 + 26.8 \times 420}{500} \approx 81.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

2) 따라서 균열로 페인트가 침투된 플랜지의 K_1 값은

$$81.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K_1 < 116 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{ 범위에 있다고 할 수 있다.}$$

용접재의 실제 파단인성치 값은 실험을 통해 구하지는 못하였지만 일반적으로 용접봉의 인장 강도가 모재보다 높으며, 탄소의 당량이 적은 점을

감안한다면 용접재의 K_c 값이 $116 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ 보다 크다고 해도 큰 잘못은 없다. 그렇기 때문에 페인트가 침투된 균열로 인하여 플랜지의 급속한 파단은 생기지 않았고 피로실험에서 입증된 것과 같이 상당한 길이의 균열로 성장하여 균열의 길이가 약 30cm를 넘어 플랜지에 파단이 생길 때까지 피로균열로 성장해 갔다.

- 3) 피로실험에서 입증된 것과 같이 한쪽 Flange가 먼저 끊어지면 순단면적은 88.2 cm^2 가 되나 최대응력은 250.2 MPa 로서 아직도 강재의 항복응력인 294 MPa 보다 낮다.

한쪽 플랜지가 끊어지고 복부판에서 균열이 시작될 때는 강재의 폭이 510mm일때 균열의 길이 $a = 0.018 \text{ m}$ 인 Single Edge Crack으로

$K_1 = Y \cdot \sigma \sqrt{a}$ 에서 $\frac{a}{w} = \frac{18}{510} = 0.035$ 일때 $Y \approx 2.1$ 이므로 K_1 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_1 &= Y \cdot \sigma \sqrt{a} \approx (2.1)(250.2)\sqrt{0.018} \\ &= 70.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \end{aligned}$$

이 값은 복부판의 파괴인성치 $K_c \approx 178.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 보다 작은 값이므로 한쪽 플랜지를 끊어지게 한 균열은 복부판에서 성장이 지연된다. 이 복부판의 파괴 인성치를 가지고 파단이 일어나기 직전의 최종 균열의 길이를 구하기 위하여 a_f 를 80mm라고 가정하면

$$\frac{a}{w} = \frac{80}{510} = 0.157 \text{ 일때 } Y \approx 2.35 \text{ 이므로,}$$

K_1 은 다음과 같고 이 값을 강재의 파괴 인성치인 K_c 값 $178.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

같다고 놓으면 최종균열의 길이 a_f 를 구할 수 있다

$$K_1 = (2.35)(250.2)\sqrt{a_f} = 178.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

여기서 a_f 는 다음과 같다.

$$a_f = 0.092\text{m} = 9.2 \text{ cm}$$

즉 최종균열 길이 9.2cm 일때, 다시 말하면 한쪽 플랜지를 두 동강낸 균열이 복부판 쪽으로 약 7.4cm 진행하면 편심이 걸린 복부판의 응력확대 계수가 복부판의 파괴인성치를 초과하게 되어 급속한 파단을 일으키게 되고 수직부재는 두 부분으로 분리된다.

8-5 붕괴원인 분석

8-5-1 개 설

8-2에 기술한 직접 붕괴원인에 관련되는 설계, 시공 및 유지관리 전반에 걸친 여러 요인들의 붕괴에 미친 영향은 교량의 붕괴가 된 수직재의 장기간에 걸쳐 누적된 피로파괴의 진전으로 인하여 촉발된 것이기 때문에 여기서는 각 요인별로 실제 추정상황하에서의 피로수명 단축에 미친 영향과 피로파괴 위험도(파괴확률)를 피로해석이론에 의해 분석하므로써 어떤 요인이 붕괴에 지배적이며 결정적인 요인으로 작용했는지를 밝혀 놓았다. 모든 분석은 설계하중하의 정상적인 설계, 시공 및 유지관리 조건과 부설시공 및 유지관리조건을 대비시켜 볼 때 요인별 단일 또는 복합적인 작용 조건으로 인한 상대적인 피로수명 단축과 피로파괴 위험도 증가정도를 해석하므로써 8-2에서 요약한 지배적인 요인들의 교량수명에 미친 상대적인 악영향의 정도를 수치적으로 밝혔다.

이를 위하여 먼저 분석에 소요되는 데이터를 요약한 다음 8-3절에서 기술한 피로수명해석과 붕괴위험도 분석이론에 따른 피로수명과 붕괴위험도를 분석·고찰하였다.

교통량 분석데이터에 의한 성수대교의 실제적인 년도별 ADTT와 중차량 통행 자료분석에 따른 트럭중량 도수분포(Histogram)나 응력반도분포를 구해서 다음과 같은 여러 조건에 대한 피로수명해석과 붕괴위험도해석을 수행하였다.

○ 분석방향 I

편수직재의 정상설계용접, 설계하중 및 기준최저교통량인 경우의 피로수명을 분석하며, 각 요인별 상대적 피로수명 감소비의 기준으로 사용한다.

○ 분석방향 II

불량용접된 수직재에 설계하중 및 기준최저교통량 조건에 대해 분석한다. 이 분석결과를 통해 교량의 통행하중은 설계하중 이하이고 유지관리가 정상인 가상상황하에서 수직재의 부설용접이라는 단일조건하에 시공부실이 붕괴에 미친 상대영향평가가 가능하다.

○ 분석방향 III

부설시공이 없이 설계대로 용접시공된 조건하에 유지관리부재와 중차량의 과도한 통행을 방치한 경우에 수직재 브래킷 및 버팀재 설치의 요인이 복합적으로 작용한 경우가 붕괴에 미친 상대 영향 평가가 가능하다.

○ 분석방향 IV

유지관리부실과 실제 중차량의 과도한 통행조건하의 시공부실로 불량용접된 수직재를 방치한 경우에 수직재 브래킷 및 버팀재 설치의 요인이 복합적으로 작용한 경우가 교량 붕괴에 미친 영향의 상대적 평가가 가능하다.

8-5-2 S-N 피로수명 분석

도로교시방서에서는 상세범주를 총 8가지로 분류하고 있다. 본 성수대교의 핀 연결 수직재의 피로설계는 이 8가지의 상세범주 중에 B상세 범주안에 든다고 판단된다. 따라서, 본 보고서에서는 설계 용접 조건에 대해서는 B상세 피로수명 S-N곡선을 기준으로 설정하였다.

먼저, 8-4-5에 주어진 피로실험결과에 대해 S-N피로선도의 기울기를 통상적인 값인 $m=3$ 으로 취할 수 있고 그 결과 S-N피로선도를 구할 수 있다. 앞에서 제시한 요인별 조건에 따라 설계하중에 대응하는 등가응력범위로부터 각 경우에 대한 피로수명을 구하였다. 그리고 기대년한을 계산하기 위한 ADTT는 현행 도로교시방서[강교편 - 부록 C]에 따른 기준최저교통량과 우리나라 주요도로상의 통행차량에 대한 중량분포데이터를 성수대교의 통행차량 중량으로 간주하고 성수대교의 실효교통량분포에 근사적으로 적용하여 추정한 (표 8-2)와 같은 통행차량 응력 빈도분포도를 적용하였다.

가. 해석상의 가정

○ 피로해석을 위한 수직재의 유효 용접 단면 치수

실제적으로 붕괴구간의 피로수명을 엄밀하게 분석하려면 실 붕괴구간의 최초 붕괴 수직재의 실패단면에 대한 시편으로부터 분석해야 하지만 현재 정확한 데이터가 없기 때문에 S-N피로시험 특성치는 피로시험시편의 유효 용접치수로부터 구하고, 피로해석은 육안조사 및 비파괴시험을 기초로 측정된 8mm 유효 용접치수를 사용하여 피로수명을 평가하였다.

○ 시편 2개에 대한 피로실험치이므로 S-N피로특성의 통계적 평가가 어려움

실제적으로는 여러 시편에 대해 시험하여 통계적으로 S-N 평균기대수명과 95% 하한 기대수명을 추정하여야 하지만 본 절의 평가결과는 시편 2개에 대한 실험치를 기초로 S-N 선도를 추정하였기 때문에 평균 및 분

산 등의 통계적 불확실량을 추정하는 것이 불가능하였음을 유의하여야 한다. 따라서 본 절의 평가결과는 이 시편 2개에 대한 평균 S-N 특성치를 기준으로 하는 S-N선도를 사용하여 보통기대수명을 분석한 것이다.

○ 실 트럭 교통량분석 결과의 근사성

본 절의 피로해석시 적용한 중량분포 및 응력빈도분포는 현재 교량이 붕괴되었고 붕괴당시까지의 중량분포를 파악한 정확한 자료가 없었기 때문에 근사적으로 추정할 수 밖에 없었다. 즉 본 절의 분석시 사용한 응력분포는 앞에서 언급한 바와같이 성수대교의 실 트럭교통량데이터와 불완전한 데이터이지만 전국 주요 도로망의 통행트럭중량분포 데이터를 성수대교의 실 트럭중량으로 간주하여 유도한 것이다. 그러므로, 실제 성수대교의 실제 중차량의 통행을 분석에서 고려할 수 있다.

○ 초과하중 분석결과의 근사성

실제로 성수대교의 경우 일반도로보다 중차량의 통행이 빈번하였고 이러한 중차량의 빈번한 통행이 피로수명단축에 크게 영향을 미쳤음을 쉽게 알수 있으나, 현재 가용한 교통량 데이터로부터 보면 중차량통행의 척도인 ρ 값이 0.54로서 설계치인 0.705보다 훨씬 작게 나타나므로 실제로는 이를 합리적으로 고려하지 못하고 있으며 따라서 본 보고서에서는 이 초과하중에 대한 효과를 원 설계하중이 DL-18임을 감안할 때 현재의 설계하중인 DL-24정도의 초과하중이 통과했을 가능성이 충분하다고 판단되어 과적차량에 대한 검토를 DL-24하중으로 적용하였다.

나. 해석을 위한 기본 데이터

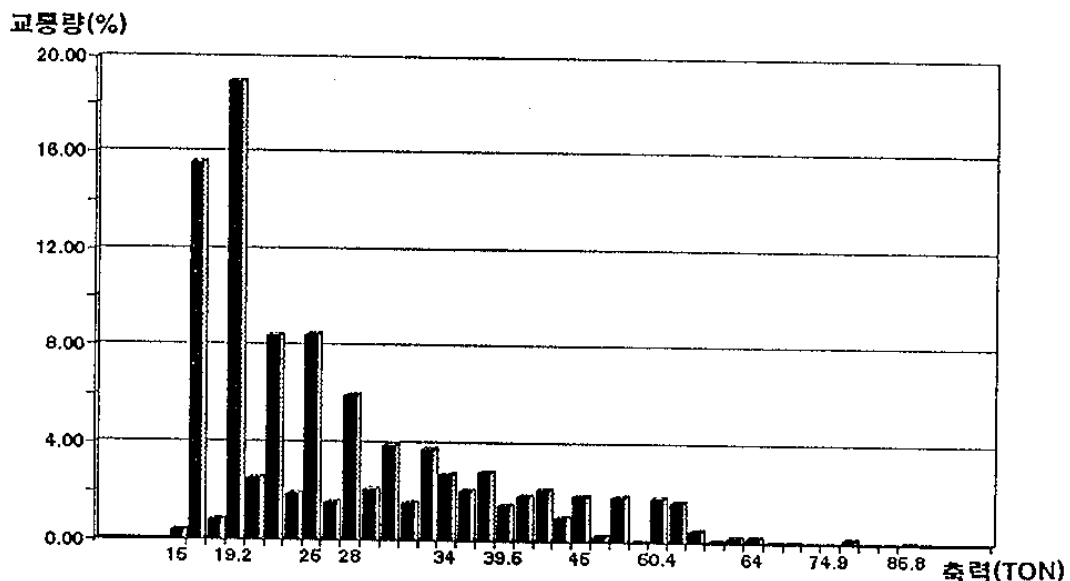
피로수명해석을 위한 기본 데이터를 4장의 시험분석결과에 근거하여 다시 한번 요약하였다.

○ 등가응력범위의 산정

등가응력범위는 변동응력의 효과(반복횟수, 응력범위)에 의한 피로손상과 동일 반복횟수로 피로손상을 야기하는 일정 응력을 말한다. 그런데, 성수대교의 등가응력을 산정하기 위한 성수대교 중량분포에 대한 데이터가 없기 때문에 전국 도로상의 트럭중량분포를 성수대교에 그대로 적용하기 위하여 Large Bus, Large Truck은 Single Truck으로 간주하고, Special Truck은 Semi-Trailer Truck으로 간주하여 중량분포를 도출하였다. 아래 (표 8-1)에 성수대교 중량분포를 정리하였고 (그림 8-6)에 그래프로 나타내었다.

(표 8-5-1)의 성수대교 중량분포 및 수직재 축력분포로부터 Semi-Trailer Truck과 Single Truck의 분포를 같이 고려하여 $[\sum \gamma_i \varphi_i^m]^{1/m} \cdot P_{rd}$ 를 구하고, 수직재의 유효 용접횟수에 대한 시편의 Net Area로부터 $\rho \cdot S_{rd}$ 를 산정하였다. 이로부터 각 조건에 대한 등가응력은 실용담비 α 를 고려하여 다음 식으로 산정하였다.

$$S_{req} = \rho \cdot S_{rd} \cdot \alpha$$



(그림 8-6) 성수대교 축력분포도

○ 설계 활하중에 의한 편연결 수직재의 응력

앞선 구조해석 결과 수직재의 최대인장력 및 최대인장응력은 DL-18 설계하중과 DL-24설계하중일 경우에 각각 다음과 같다.

- DL-18 설계하중

○ 편연결 수직재의 최대인장력 : 58.6ton

○ 편연결 수직재의 최대인장응력

- 정상설계용접인 경우는 Gross Area가 228cm² 이므로

$$58.6 \times 103 / 228 = 257.0 \text{ kg/cm}^2$$

- 부실용접(8 mm용접)인경우 순유효용접 단면적이 128cm²

$$58.6 \times 103 / 128 = 457.8 \text{ kg/cm}^2$$

- DL-24 설계하중

○ 편연결 수직재의 최대인장력 : $58.6 \times 24 / 18 = 78.1\text{ton}$

○ 편연결 수직재의 최대인장응력

- 정상설계용접인 경우는 Gross Area가 228cm² 이므로

$$78.1 \times 103 / 228 = 342.7\text{kg/cm}^2$$

- 부실용접(8 mm용접)인경우 순유효용접단면적이 128cm²

$$78.1 \times 103 / 128 = 610.4\text{kg/cm}^2$$

○ S-N 선도

본 분석방향 중 정상설계에 대한 조건일 경우 도로교 시방서 B상세 설계 S-N 선도를 사용하였으며, 기본 데이터는 [도로교시방서, 부록C 표 C.1.1 적용]를 사용하였다.

○ 설계 S-N 피로곡선

- B상세, 단재하경로 구조물

$$m = 3.372$$

50만회 허용응력범위 : 1610kg

200만회 허용응력범위 : 1120kg

200만회이상 허용응력범위(피로한계치) : 1120kg

○ 피로실험 데이터

다음은 피로시험 데이터 중 시편 1과 시편 3에 대한 기본 데이터를 나타내고 있으며 이를 기초로 평균 S-N 선도를 추정하였다.

- 시편 1

DL-18하중에 대한 최대인장력

$$Pr_{18} = 58.6 \text{ ton}$$

유효용접단면 $Ar_{18} = 118\text{cm}^2$

응력범위 $Sr_{18} = 496.6 \text{ kg/cm}^2$

피로파괴 반복회수 $N = 2,560,000$

$$m=3, \log C=14.496$$

- 시편 3

DL-24하중에 대한 최대인장력

$$Pr_{24} = 77.94 \text{ ton}$$

유효용접단면 $Ar_{24} = 111\text{cm}^2$

응력범위 $Sr_{24} = 703.6 \text{ kg/cm}^2$

피로파괴 반복회수 $N = 993,000$

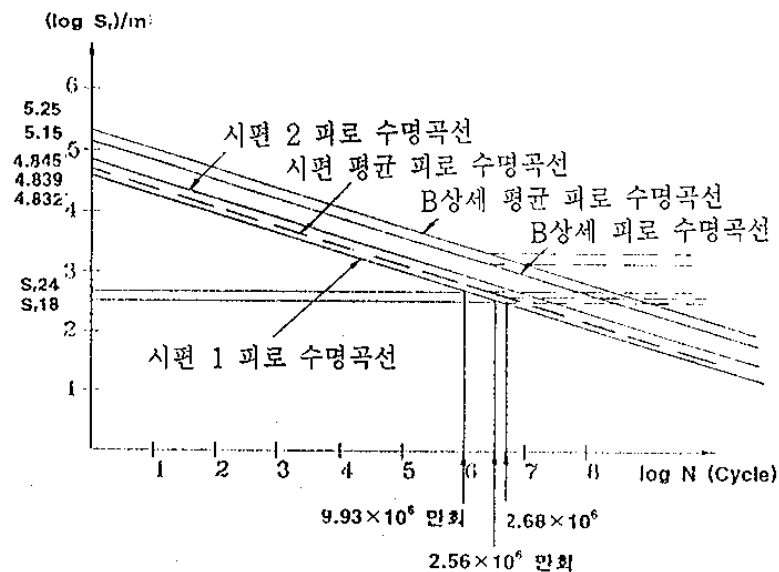
$$m=3, \log C=14.536$$

- 평균 S-N선도

$$\log C_{ave} = (14.536 + 14.496)/2 = 14.516, m=3$$

$$N_{nave} = C_{ave} / S_{r18}^3 = 2.679 \times 10^6$$

$$N_{nave} = C_{ave} / S_{r24}^3 = 9.419 \times 10^5$$



(그림 8-7) 시편에 대한 S-N피로선도

(표 8-1) 성수대교 중량 및 수직재 축력 분포도

Load Step (ton)	Mean Value (ton)	Axial Force at Vertical P (ton)	Single Truck		Semi-Trailer Truck	
			Volume Ratio, r(%)	$r \times P^3/100$	Volume Ratio, r(%)	$r \times P^3/100$
10 ~ 12	11	14.98			0.40	13.60
		16.21	15.62	665.75		
12 ~ 14	13	17.71			0.87	48.49
		19.16	19.00	1337.16		
14 ~ 16	15	20.43			2.59	220.69
		22.11	8.42	909.65		
16 ~ 18	17	23.15			1.96	242.95
		25.06	8.49	1336.50		
18 ~ 20	19	25.88			1.60	277.51
		28.01	6.01	1319.87		
20 ~ 22	21	28.60			2.14	499.59
		30.95	3.93	1166.77		
22 ~ 24	23	31.33			1.62	497.24
		33.90	3.82	1487.14		
24 ~ 26	25	34.05			2.78	1098.33
		36.85	2.84	1420.11		
26 ~ 28	27	36.77			2.12	1053.77
		39.80	1.90	1196.73		
28 ~ 30	29	39.50			1.49	916.99
		42.75	0.98	764.36		
30 ~ 32	31	42.22			2.15	1619.28
		45.69	0.25	242.75		
32 ~ 34	33	44.95			1.94	1762.41
		48.64	0.06	67.58		
34 ~ 36	35	47.67			1.91	2067.62
36 ~ 38	37	50.39			1.86	2380.60
38 ~ 40	39	53.12			1.70	2545.46
40 ~ 42	41	55.84			0.49	845.00
42 ~ 44	43	58.57			0.11	227.45
44 ~ 46	45	61.29			0.26	595.86
46 ~ 48	47	64.01			0.24	636.46
48 ~ 50	49	66.74			0.05	144.24
50 ~ 52	51	69.46			0.08	271.06
52 ~ 54	53	72.19			0.02	60.84
54 ~ 56	55	74.91			0.02	67.99
56 ~ 58	57	77.63			0.21	983.90
58 ~ 60	59	80.36			0.00	0.00
60 ~ 62	61	83.08			0.03	185.53
62 ~ 64	63	85.81			0.05	306.57
Sum			71.32	11914.36	28.68	19569.43

○ 교통량 데이터

○ 기준최저교통량 ADTT 는 시방서 규정값인 2,500을 사용하였음.

○ 성수대교 교통량 데이터

성수대교의 교통량데이터는 양방향에 같이 집계된 왕복교통량으로 분석에 필요한 ADTT는 일방향이므로 양쪽 방향이 같다는 가정하에 왕복교통량의 반(半)을 실 트럭교통량 ADTT로 취했다. 또한, 성수대교의 차선수는 편도 2차선이므로 ASSHTO 규준에 따라 변환계수 0.85를 적용하여 1차선 ADTT를 구하였으며 계산과정은 아래와 같다.

- AASHTO시방서[1994] 3-6-1. 4절 규준에 의한 ADTT의 차선수에 따른 ADTT single lane로의 변환계수 = 0.85 (2차선)

- 실 트럭교통량 ADTT (왕복) = 10,549

※ 실 트럭교통량 ADTT (1방향) = $10,549/2 \times 0.85 = 4483$
(=0.85×일일평균 교통량)

- 성수대교에 피로파손(Fatigue damage)을 주는 총트럭 통행량 중에 DB-18트럭 (총중량 32.4tons) 이상의 중량이 되는 트럭도 총트럭통행량의 9.03%인 3,365,763대 포함됨.

(표 8-2) 성수대교 년도별 일일 교통량 분포표 (양방향)

Year	Sum	
	/day	/year
1994	10,684	3,899,660
1993	8,276	3,020,740
1992	8,248	3,010,520
1991	6,810	2,485,650
1990	8,874	3,239,010
1989	5,628	2,054,220
1988	8,321	3,037,165
1987	9,341	3,409,465
1986	10,359	3,781,035
1985	11,379	4,153,335
1984	15,948	5,821,020
1983	14,943	5,454,195
1982	14,002	5,110,730
1981	13,121	4,789,165
1980	12,296	4,488,040
Sum	158,230	57,753,950
ADTT (2 방 향)	158,230	57,753,950
ADTT (일 방 향)	158,230	57,753,950
ADTT (단일차선)	158,230	57,753,950

● 브래킷 설치에 의한 추가 응력 해석에 관한 데이터

○ 수직재 브래킷 설치시기 및 가로보 지지 구조물 설치시기 및 피로반복회수

- 1979. 10 : 개 통
- 1991. 9 : 브래킷 구조물 설치 시기
- 1993. 4 : 가로보 지지 구조물 설치시기
- 1994. 10 : 붕 괴

○ 해석단계 선정

아래의 활하중 효과에서 기술하였듯이 브래킷 구조물 설치로 인한 활하중 효과와 가로보 지지 구조물 설치로 인한 활하중 효과가 큰 차이가 없기 때문에 다음과 같이 두 단계로 나누어 분석하였으며, (표 8-3)에 정리하였다.

- STEP 1 : 시공시 부터 브래킷 구조물 설치 직전까지의 기간
- STEP 2 : 브래킷 설치 시기부터 붕괴 시점까지의 기간

(표 8-3) 피로반복 회수

구 분	기 간	년수(year)	피 로 반 복 회 수
STEP 1	1979.10 ~ 1991. 9	11.92	$365 \times 11.92 \times 4483 = 1.950 \times 10^7$
STEP 2	1991.10 ~ 1994.10	4.08	$365 \times 4.08 \times 4483 = 6.676 \times 10^6$

○ 구조해석 결과

다음 (표 8-4)에는 구조해석을 통한 브래킷만 설치된 수직재의 용접이음부에 발생 가능한 최대인장응력의 해석결과를 정리하였으며, (표 8-5)에는 브래킷 구조물과 가로보 지지구조물이 설치된 수직재의 상단 용접이음부에 발생가능한 최대인장응력 계산 결과를 정리하였다.

(표 8-4) 브래킷만 설치된 수직재 용접이음부의 최대인장응력

구 분	인 장 응 력(kg/cm ²)
브래킷의 영향	175
핀마찰의 영향	240
축력의 영향 (사하중+활하중)	1100
계	1515

(표 8-5) 브래킷 구조물과 가로보 지지구조물이 설치된 수직재 상단용접
이음부의 최대인장응력

구 분	인 장 응 력(kg/cm ²)
가로보 지지 구조물의 영향	680
핀마찰의 영향	-240
축력의 영향 (사하중+활하중)	1100
계	1540

○ 활하중에 의한 응력 효과 산정

즉, 하중만의 응력이 729.4cm²(Loss Area인 경우 = 166.3ton/228cm²
= 729.4cm²)임을 감안하면 나머지 부분이 활하중응력이라고 할 수 있
으므로 브래킷 설치만에 의한 활하중응력의 효과는 위의 표로부터 다음
과 같이 산정할 수 있다.

$$1515 - 729.4 = 785.6(\text{kg/cm}^2) \text{ (Gross Area인 경우)}$$

한편 브래킷에 가로보 지지 구조물 설치 추가로 인한 활하중응력 효과는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$1540 - 729.4 = 810.6(\text{kg/cm}^2)$$

위 결과는 Gross Area로부터 구한 응력이므로 Gross Area=228kg/cm²와 실패단면의 Net Area=128kg/cm²로부터 실응력으로 환산된 활하중효과를 유도하면 다음과 같다.

브래킷 구조물만 설치되었을 경우의 실용접단면으로 환산된 활하중 응력은 다음과 같다.

$$228/128 \times 785.6 = 1399.4(\text{kg/cm}^2)(\text{Net Area인 경우})$$

브래킷에 가로보 지지 구조물 설치 추가로 인한 실용접단면으로 환산된 활하중 응력은 다음과 같다.

$$228/128 \times 795.6 = 1417.2(\text{kg/cm}^2)(\text{Net Area인 경우})$$

그러나 위의 결과는 일일온도변화에 의한 응력의 증가가 활하중 응력과 발생빈도가 다르므로 산술적인 합산이 될 수 없으나 최악의 경우에 대한 해석을 위하여 위의 경우에 대해서 피로해석을 실시하였다.

○ 브래킷 설치로 인한 활하중 효과

브래킷 및 가로보 지지 구조물의 수직재에 미치는 구조적 영향을 분석한 응력해석 결과로부터 활하중에 의한 최종적으로 계산한 응력의 증가효과를 다음 (표 8-6)에 정리하여 놓았다.

(표 8-6) 브래킷 설치로 인한 활하중 효과

단위 : kg/cm²

구 분	활하중 효과 (Gross Area)	활하중 효과 (Net Area)	활하중에 의한 최대인장응력 (Net Area)	브래킷만의 활하 중효과 증가분 (Net Area)
브래킷 설치로 인한 영향	785.6	1399.4	458.6	940.8
브래킷에 가로보 지 지 구조물의 추가 설치로 인한 영향	816.0	1417.2	458.6	958.4

다. 분석방향

S-N피로해석에 의한 피로수명의 추정치는 (표 8-7)과 같이 크게 4가지 요인별 조건부 해석에 의해 수행하였으며, 분석방향 III, IV는 다시 5가지의 세부분석조건에 의해 분석하였다. 자세한 분석방향 및 세부분석조건에 대한 총괄표를 (표 8-7)에 요약하여 제시하였고 각 세부분석조건에 대한 구체적인 해석조건을 아래에 요약하여 기술하였다.

(표 8-7) 분석방향 및 세부분석 조건에 대한 총괄표

분 석 방 향 및 세 부 분 석 조 건		기 호
분 석 방 향	세 부 분 석 조 건	
정상설계용접된 편연결 수직재의 설계하중 및 기준최저교통량에 대한 분석	정상설계용접/설계하중(DL18)/기준최저교통량	I
부실용접된 편연결 수직재의 설계하중 및 설계교통량에 대한 분석(시공부실 단일 요인 분석)	부실용접/설계하중(DL18)/기준최저교통량	II
정상설계용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실에 대한 분석(유지관리부실 단일요인 분석)	정상설계용접/설계하중(DL18)/실교통량	III-1
	정상설계용접/초과하중(DL24)/실교통량	III-2
	정상설계용접/설계하중(DL18)/실교통량/2차 및 국부응력의 영향	III-3
	정상설계용접/설계하중(DL18)/실교통량/브래킷 설치의 영향	III-4
	정상설계용접/초과하중(DL24)/실교통량/2차 및 국부응력고려/브래킷 설치의 영향	III-5
	브래킷 설치 전단계 브래킷 설치후 단계	
부실용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실에 대한 분석(설계/시공부실 복합 요인 분석)	부실용접/설계하중(DL18)/실교통량	IV-1
	부실용접/초과하중(DL24)/실교통량	IV-2
	부실용접/설계하중(DL18)/실교통량/2차 및 국부응력의 영향	IV-3
	부실용접/설계하중(DL18)/실교통량/브래킷 설치의 영향	IV-4
	부실용접/초과하중(DL24)/실교통량/2차 및 국부응력고려/브래킷 설치의 영향	IV-5
	브래킷 설치전단계 브래킷 설치후 단계	

1) 분석방향 I : 정상용접된 편연결 수직재의 설계하중 및 기준최저교통량 조건에 대한 분석

분 석 조 건> 정상설계용접/설계하중/기준최저교통량

적용데이터> - B형상세설계 S-N 곡선

- $\alpha = 0.5$ (설계치)
- $\rho = 0.705$ (설계치)
- DL18 설계하중
- ADTT = 2,500(기준최저 트럭교통량)

2) 분석방향 II : 부실용접된 편연결 수직재의 설계하중 및 기준최저교통량 조건에 대한 분석

분석조건> 부실용접/설계하중/기준최저교통량/유지관리 부실

적용데이터> - 실기대 S-N선도(시편 1, 3에 대한 평균 S-N선도)

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)
- $\rho = 0.705$ (설계치)
- 설계하중(DL18 설계하중)
- ADTT = 2,500(기준최저 트럭교통량)

3) 분석방향 III : 정상설계용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실조건에 대한 분석

○ 분석방향 III-1 : 실 추정 트럭 교통량조건에 대한 영향

분 석 조 건> 정상설계용접/설계하중/실 트럭교통량/유지관리 부실

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)
- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)
- 설계하중(DL18 설계하중)
- ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

○ 분석방향 III-2 : 중차량의 통행증가에 대한 영향

분 석 조 건> 정상설계용접/과적하중/실 트럭교통량/유지관리 부실

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 초과하중(DL24 설계하중)

- ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

○ 분석방향 III-3 : 총체적 부실로 인한 2차 응력의 영향

분 석 조 건> 정상설계용접/설계하중/실 트럭교통량/유지관리 부실/

2차 및 국부응력 효과

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 1.21$ (재하시험에 의한 Peak응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 설계하중(DL18 설계하중)

- ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

○ 분석방향 III-4 : 브래킷 설치의 영향

분 석 조 건> 정상설계용접/설계하중/실 트럭교통량/유지관리 부실/브

래킷 설치

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 설계하중(DL18 설계하중)

- ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

○ 분석방향 III-5 : 종합적 영향

분 석 조 건> 정상설계용접/ 과적하중/ 실 트럭교통량/ 2차 및 국부응력 효과/ 유지관리부재/ 브래킷설치 영향

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 1.21$ (재하시험에 의한 Peak응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 초과하중(DL24 설계하중)

- ADTT = 4,483(기준최저교통량)

4) 분석방향 IV : 부실용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실에 대한 분석

○ 분석방향 IV-1 : 실 추정 트럭 교통량에 대한 영향

분 석 조 건> 부실용접/ 설계하중/ 실 트럭교통량/ 유지관리 부실

적용데이터> - 실 S-N 기대 곡선(시편 1, 3의 피로시험 데이터로 부터 추정한 평균 실 S-N 기대 곡선)

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 설계하중(DL18 설계하중)

- ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

○ 분석방향 IV-2 : 중차량의 통행증가에 대한 영향

분 석 조 건> 부실용접/초과하중/실 트럭교통량/유지관리 부실

적용데이터> - $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 초과하중(DL24 설계하중)

- ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

○ 분석방향 IV-3 : 복합적 부실로 인한 2차응력의 영향

분 석 조 건> 부실용접/ 설계하중/ 실 트럭교통량/ 유지관리 부실/ 2차 및 국부응력 효과

- 적용데이터> - 실 S-N 기대 곡선(시편 1, 3의 피로시험 데이터로부터 추정한 평균 실 S-N 기대 곡선)
- $\alpha = 1.21$ (재하시험에 의한 Peak응력에 대한 실응답비)
 - $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)
 - 설계하중(DL18 설계하중)
 - ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

○ 분석방향 IV-4 : 브래킷 설치의 영향

분 석 조 건> 부실용접/ 설계하중/ 실 트럭교통량/ 브래킷 설치의 효과/ 유지관리 부실

- 적용데이터> - 실 S-N 기대 곡선(시편 1, 3의 피로시험 데이터로부터 추정한 평균 실 S-N 기대 곡선)
- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)
 - $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)
 - 설계하중(DL18 설계하중)
 - ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

○ 분석방향 IV-5 : 종합적 영향

분 석 조 건> 부실용접/ 초과하중/ 실 트럭교통량/ 2차 및 국부응력 효과/ 유지관리 부실/ 브래킷설치 영향

- 적용데이터> - 실 S-N 기대 곡선(시편 1, 3의 피로시험 데이터로부터 추정한 평균 실 S-N 기대 곡선)
- $\alpha = 1.21$ (재하시험에 의한 Peak응력에 대한 실응답비)
 - $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)
 - 초과하중(DL24 설계하중)
 - ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

라. 분석결과 및 평가

각 분석방향에 대한 결과를 다음에 정리하였다. 이때, 등가응력범위(S_{req})를 B상세의 피로한계치와 비교함과 동시에 S-N선도를 threshold이하에서도 연장된 것으로 가정하여 피로수명을 계산하였다. 즉, 등가응력범위가 B상세 피로한계치보다 작은 경우 이론적으로 피로수명이 무한대라 보지만 threshold이하의 S-N선도 연장선상에서 피로수명을 구하였을 때는 이 값이 적용된 분석조건에서의 최소한의 피로수명이라 볼 수 있다.

1) 분석방향 I : 정상용접된 편연결 수직재의 기준최저교통량 및 설계하중조건에 대한 분석

분 석 조 건> 정상설계용접/ 설계하중/ 기준최저 교통량

적용데이터> - B형상세설계 S-N 곡선

- $\alpha = 0.5$ (설계치)

- $\rho = 0.705$ (설계치)

- DL18 설계하중

- ADTT = 2,500(기준최저 교통량)

분석결과>

- 등가응력범위

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd}$$

$$= 0.705 \times 0.5 \times 257.0$$

$$= 90.59 < \text{B상세 피로한계치} = 1120 \text{ kg/cm}^2$$

- 기대 피로수명

$$C = 7.638 \times 10^{16}$$

$$N = C / S_{eq}^m = \frac{7.638 \times 10^{16}}{90.59^{3.372}} = 1.922 \times 10^{10}$$

- 기대 피로년한

$$Y_E = \frac{N}{365 \times ADTT} = \frac{1.922 \times 10^{10}}{365 \times 2,500} \approx 21061(\text{년})$$

분석평가> 등가응력범위가 피로한계치 이하이므로 피로파괴가 발생하지 않지만 피로한계치 이하로 연장된 S-N 선도상에서 피로수명을 구해보더라도 21061년으로서 설계 및 기준최저교통량의 조건하에서는 피로파괴가 일어나지 않는다는 사실을 알 수 있다.

2) 분석방향 II : 부실용접된 편연결 수직재의 설계하중 및 기준최저교통량조건에 대한 분석

분 석 조 건> 부실용접/ 설계하중/ 기준최저교통량/ 유지관리 부실

적용데이터> - 실 기대 S-N선도(시편 1, 3에 대한 평균 S-N선도)

- $\alpha = 0.87$ (실응답비 : 1차응력응답비)

- $\rho = 0.705$ (설계치)

- DL-18설계하중

- 기준최저교통량 ADTT=2500(기준최저교통량)

분 석 결 과>

- 기대 피로수명

$$C = 3.281 \times 10^{14} \quad 1014$$

$$S_{eq} = \rho \cdot S_r \cdot \alpha = 0.705 \times 457.8 \times 0.5 = 161.38 \text{ kg/m'}$$

$$N = C / S_{eq}^m = \frac{3.281 \times 10^{14}}{161.38^{3.372}} = 7.8065 \times 10^7$$

- 기대 피로파괴년한

$$Y_E = \frac{N}{365 \times ADTT} = \frac{7.8065 \times 10^7}{365 \times 2,500} \approx 86$$

분석평가> 이상에서 부실용접의 단일조건에 대한 기대 피로파괴연한이 86년이므로 실패파괴연한인 15년에 비해 상대적으로 매우 크게 나타났기 때문에 부실용접의 단독원인만으로는 붕괴가 일어나지 않음을 알 수 있다.

3) 분석방향 III : 정상설계용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실에 대한 분석

○ 분석방향 III-1 : 실 추정 트럭 교통량에 대한 영향

분 석 조 건> 정상설계용접/ 설계하중/ 실 트럭교통량/ 유지관리 부실

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 설계하중 (DL-18 설계하중)

- ADTT = 4,483 (실 트럭교통량)

분 석 결 과>

- 등가응력범위

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd}$$

$$= 0.54 \times 0.87 \times 257.0$$

$$= 120.7 \quad \langle \text{B상세 피로한계치} = 1120 \text{ kg/cm}^2$$

- 기대 피로수명

$$C' = 7.638 \times 10^{16}$$

$$N = C / S_{eq}^m = \frac{7.638 \times 10^{16}}{120.7^{3.372}} = 7.302 \times 10^9$$

- 기대 피로연한

$$Y_E = \frac{N}{365 \times ADTT} = \frac{7.302 \times 10^9}{365 \times 4,483} \approx 4463 (\text{년})$$

분석평가> 등가응력범위가 피로한계치이고 피로한계치 이하에서 연장된 S-N 선도상에서 기대 피로파괴년한을 구해보아도 4463년으로서 유지관리부실 자체만으로는 피로파괴가 일어날 가능성은 없음을 알 수 있다.

○ 분석방향 III-2 : 중차량의 통행증가에 대한 영향

분석조건> 정상설계용접/과적하중/실 트럭교통량/유지관리 부실

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 과적하중(DL24 설계하중)

- ADTT = 4,483 (실 트럭교통량)

분석결과>

○ 기대 S-N 선도상에 대한 기대수명

- 기대 피로수명

$$S_{req} = \rho \cdot \alpha \cdot S_{rd} = 0.54(0.87)(342.7) = 161.0 \text{ kg/cm}^2 < \text{B상세 피로한계치} = 1120 \text{ kg/cm}^2$$

$$\therefore N = \frac{C}{S_{eq}^m} = \frac{7.638 \times 10^{16}}{161.0^{3.372}} = 2.764 \times 10^9$$

- 기대 피로파괴년한

$$\therefore Y_E = \frac{2.764 \times 10^9}{365 \times 4483} \approx 1689 (\text{년})$$

분석평가> 허용응력 범위가 피로한계치 이하이며 피로한계치 이하의 연장된 S-N 선도상에서의 피로수명이 1689년으로서 피로파괴될 가능성이 없음을 알 수 있다.

○ 분석방향 III-3 : 복합적 부실로 인한 2차응력의 영향

분 석 조 건> 정상설계용접/ 설계하중/ 실 트럭교통량/ 유지관리 부실/ 2차 및 국부응력 효과

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 1.21$ (재하시험에 의한 Peak응력에 대한 실응답비)
- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)
- 설계하중(DL18)
- ADTT = 4,483 (실 트럭교통량)

분 석 과 정>

- 등가응력범위

$$\begin{aligned} S_{req} &= \rho \alpha S_{rd} \\ &= (0.54)(1.21)(257.0) \\ &= 167.92 < \text{B상세 피로한계치} = 1120 \text{kg/cm}^2 \end{aligned}$$

- 기대 피로수명

$$C = 7.638 \times 10^{16}$$

$$N = C / S_{eq}^m = \frac{7.638 \times 10^{16}}{167.92^{3.372}} = 2.398 \times 10^9$$

- 기대 피로파괴년한

$$Y_E = \frac{N}{365 \times ADTT} = \frac{2.398 \times 10^9}{365 \times 4,483} \doteq 1466 (\text{년})$$

분 석 평 가> 등가응력범위가 피로한계를 초과하지 않기 때문에 시방서
기준에 의해서는 피로파괴가 발생하지 않음을 알 수 있으며
연장된 S-N 선도상에서 기대 피로파괴년한을 구해 보더라도
1466년으로서 유지관리부재와 복합적 부실로 인한 2차

및 국부응력 자체만으로는 구조물의 피로파괴가 발생할 가능성이 없음을 알 수 있다.

○ 분석방향 III-4 : 브래킷 설치의 영향

분 석 조 건> 정상설계용접/설계하중/실 트럭교통량/유지관리 부실/브래킷 설치 영향

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 설계하중 (DL18 설계하중)

- ADTT = 4,483 (실 트럭교통량)

분 석 결 과>

○ 등가응력범위

- STEP 1 (개통시부터 브래킷 설치시점)의 등가응력범위는 다음과 같다.

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} = 0.54(0.87)(257.02) = 120.75 (\text{kg/cm}^2)$$

- STEP 2 (브래킷 설치시점에서 붕괴시점까지)의 등가응력범위는 다음과 같다.

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} = 0.54(0.87)(785.6) = 369.07 (\text{kg/cm}^2)$$

($\because$ 표 8.5.7에서 활하중효과(Gross Area)가 785.6kg/cm²)

○ 피로수명해석

단계별로 등가응력범위가 나누어지므로 앞선 분석이론에서 언급한 바 있는 Miner 의 누적손상법칙($\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_i}{N_i} = 1$ 이 될 때 피로파괴)을 적용하여 피로수명을 예측할 수 있다.

STEP 1 : 시공후 브래킷 설치전 단계

$$C = 7.638 \times 10^{16}$$

$$N_1 = C / S_{eq}^m = \frac{7.638 \times 10^{16}}{120.75^{3.372}} = 7.292 \times 10^9$$

$$N_1 = 1.95 \times 10^7 (\because \text{표 8-3 피로반복회수 참조})$$

STEP 2 : 브래킷 설치후 단계

$$C = 7.638 \times 10^{16}$$

$$N_2 = C / S_{eq}^m = \frac{7.638 \times 10^{16}}{369.07^{3.372}} = 1.685 \times 10^8$$

$$\frac{1.95 \times 10^7}{7.292 \times 10^9} + \frac{n}{1.685 \times 10^8} = 1 \text{ 이 될 때 피로파괴된다.}$$

$$\text{즉, } n = 1.685 \times 10^8 (1 - 1.95 \times 10^7 / 7.292 \times 10^9) = 1.680 \times 10^8$$

따라서, 기대 피로파괴년한

$$Y_E = 11.92 + 1.680 \times 10^8 / (365 \times 4483) \approx 115(\text{년})$$

분석평가> 정상설계용접된 편연결 수직재에 대한 가로보 보수용 브래킷 설치의 영향에 대한 분석 결과 기대피로파괴년한이 115년으로서 피로파괴가 일어날 가능성은 거의 없으나 브래킷 설치를 하지 않은 조건하에서의 기대수명인 1466년의 8% 정도 수준인 115년으로 급격하게 단축됨을 알 수 있다.

○ 분석방향 III-5 : 종합적 영향

분석조건> 정상설계용접/초과하중/실 트럭교통량/유지관리 부실/2차 및 국부응력 효과/브래킷설치 영향

적용데이터> - B형상세설계 S-N 기대곡선

- $\alpha = 1.21$ (재하시험에 의한 Peak응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)
- 초과하중(DL24 하중)
- ADTT = 4,483 (실 트럭교통량)

분석 결과>

○ 등가응력범위

- STEP 1 (개통시부터 브래킷 설치시점)의 등가응력범위는 다음과 같다.

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} = 0.54(1.21)(342.7) = 223.92 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

- STEP 2 (브래킷 설치시점에서 붕괴시점까지)의 등가응력범위는 다음과 같다.

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} = 0.54(1.21)(785.6) = 513.30 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

○ 피로수명해석

STEP 1 : 시공후 브래킷 설치전 단계

$$C' = 7.638 \times 10^{16}$$

$$N_1 = C / S_{eq}^m = \frac{7.638 \times 10^{16}}{223.7^{3.372}} = 9.118 \times 10^8$$

$$n_1 = 1.95 \times 10^7$$

STEP 2 : 브래킷 설치후 단계

$$N_2 = C / S_{eq}^m = \frac{7.638 \times 10^{16}}{513.30^{3.372}} = 5.541 \times 10^7$$

$$\frac{1.95 \times 10^7}{9.118 \times 10^8} + \frac{n}{5.541 \times 10^7} = 1 \text{ 이 될 때 피로파괴된다.}$$

$$\text{즉, } n = 5.541 \times 10^7 (1 - 1.95 \times 10^7 / 9.118 \times 10^8) = 5.42 \times 10^7$$

따라서, 기대피로피괴년한

$$Y_E = 11.92 + 5.42 \times 10^7 / (365 \times 4483) \approx 45(\text{년})$$

분석평가> 정상설계용접된 편연결 수직재는 중트럭의 통행 방치와 2차응력 및 국부응력 효과, 브래킷 설치의 영향이 복합적으로 작용한 조건하에서는 최소 기대수명이 45년으로서 피로파괴가 일어날 가능성은 희박하다. 브래킷 설치를 하지 않은 조건하에서의 기대수명인 1466년의 3%정도 수준으로 수명이 더욱더 급격하게 단축됨을 알 수 있고, 브래킷 설치후 과적차량 영향까지 고려한 기대수명은 실패통량 조건에 대한 기대수명 115년의 39% 정도인 45년으로 크게 감소됨을 알 수 있다.

4) 분석방향 IV : 부실용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실에 대한 분석

○ 분석방향 IV-1 : 실 추정 트럭교통량에 대한 영향

분석조건> 부실용접/ 유지관리 부실/ 설계하중/ 실 트럭교통량

적용데이터> - 실 기대 S-N 곡선

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 설계하중(DL18 설계하중)

- ADTT = 4,483(기준최저 교통량)

분석결과>

- 기대 피로수명

실 트럭교통량에 대응하는 부실용접에 대한 등가응력의 산정은 다음과 같이 교통량분포로부터 획득한 응력과 실측정에 의한 응답비로부터 산정한다.

$$S_{req} = \rho \cdot a \cdot S_{rd} = 0.54 \times 0.87 \times 457.82 = 215.08 \text{ kg/cm}^2$$

$$\therefore N = \frac{C}{S_{eq}^m} = \frac{3.281 \times 10^{14}}{215.08^3} = 3.298 \times 10^7$$

- 피로기대년한

$$15\text{년간 총 ADTT (왕복)} = \sum_{i=0}^{15} ADTT_i = 158230$$

$$\therefore 15\text{년간 총 ADTT (일 방향)} = 158230/2 = 79115$$

$$15\text{년간 평균 } ADTT_{sl} = 0.85 \times 79115/15 = 4483$$

$$\therefore Y_E = \frac{3.298 \times 10^7}{365 \times 4483} \doteq 20$$

분석평가> 위의 분석결과로 볼 때 성수대교는 유지관리 부실과 실 트럭교통량에 대하여 붕괴 파단면과 같은 부실용접에 의한 기대년한이 약 20년으로 실패피연한인 15년과 비슷하게 나타났다. 이 값에다 과적차량, 2차응력, 브래킷 영향 등을 부실용접과 총체적 유지관리 부실의 복합적인 원인을 고려한다면 15년만에 붕괴가 일어날 수밖에 없음을 명백히 보여주었다. 즉, 부실용접단면에 대한 설계기준 트럭교통량에 의한 피로기대년한인 86년에 비해 유지관리 부실과 실 추정 트럭통행의 조건하에서는 기대수명이 86년의 23.5% 수준인 20년으로 급격하게 감소됨을 보여준다.

○ 분석방향 IV-2 : 중차량의 통행증가에 대한 영향

분석조건> 부실용접/ 유지관리 부실/ 과적하중/ 실 트럭교통량

적용데이터> - 실 S-N 기대 곡선(시편 1, 3의 피로시험 데이터로부터

추정한 평균 실 S-N 기대 곡선)

- $\alpha = 0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)
- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)
- 설계하중(DL24 설계하중)
- ADTT = 4,483

분석결과>

○ 등가응력 S_{eq}

$$S_{eq} = \rho \cdot \alpha \cdot S_{rd} = 0.54 \times 0.87 \times 610.4 = 286.8 \text{ kg/cm}^2$$

○ 평균기대 S-N선도에 대한 기대수명

- 기대 피로수명

$$N = \frac{C}{S_{eq}^m} = \frac{3.281 \times 10^{14}}{286.2^3} = 1.391 \times 10^7$$

- 피로파괴 기대년한

$$Y_E = \frac{1.391 \times 10^7}{365 \times 4483} \approx 8.5$$

분석평가> 부실용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실과 교통량 증가의 영향에 따른 피로파괴 기대년한이 8.5년으로서, 이 결과는 과적트럭의 통행이 15년만의 붕괴에 큰 영향을 미쳤음을 보여주고 있다. 즉, 유지관리 부실에 과적트럭 통행을 고려하지 않은 실하중 조건하 기대수명 20년의 42.5% 정도 수준인 8.5년으로 피로수명이 급격하게 단축됨을 알 수 있다.

○ 분석방향 IV-3 : 복합적 부실로 인한 2차응력의 영향

분석조건> 부실용접/설계하중/실 트럭교통량/2차 및 국부응력 효과

편연결 수직재는 재하시험결과에서도 나타났듯이 수직재 및 설계상세의 부적절성, 테이퍼단면 처리의 부적절성, 열화손상 방치 등 설계, 시공, 유지관리의 부실로 인하여 용접부의 국부 및 2차응력이 크게 발생되어 있는 구조로 되어 있기 때문에 2차응력 및 국부응력에 대한 중앙수직재 재하시험에 따른 실응답비의 평균치인 $\alpha = 1.21$ 을 적용하여 피로파괴수명을 산정하였다.

적용데이터> - 실 S-N 기대 곡선(시편 1, 3의 피로시험 데이터로 부터 추정한 평균 실 S-N 기대 곡선)

- $\alpha = 1.21$ (재하시험에 의한 Peak응력에 대한 실응답비)
- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)
- 설계하중(DL18 설계하중)
- ADTT = 4,483(본 트럭교통량)

분석 결과>

○ 등가응력 S_{eq}

$$S_{eq} = 0.54 \times 1.21 \times 457.8 = 299.1 \text{ kg/cm}^2$$

○ 평균기대 S-N선도에 대한 기대수명

- 기대 피로수명

$$N = \frac{3.281 \times 10^{14}}{298.5^3} = 1.226 \times 10^7$$

- 피로 기대년한

$$Y_E = \frac{1.226 \times 10^7}{365 \times 4483} \approx 7.5$$

분석결과> 부설용접된 수직재에 설계, 시공, 유지관리의 복합적 부설로 인한 2차응력 및 국부응력을 고려한 peak응답비로부터 구한 등가응력에 의한 기대피로수명이 $Y_E=7.5$ 년으로, 복합적 부설로 인한 2차·국부응력의 영향이 피로수명 단축에 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 즉, 부설용접에 단순한 유지관리 부설만이 있는 조건에 대한 피로기대수명 20년에 비하여 이 값의 약 37.5% 수준인 7.5년으로 단축됨을 알 수 있다. 그러나, 이 수치는 해석모형도 단순할 뿐 아니라 peak응력이 모든 복합적인 요인을 포함하고 있기 때문에 피로수명의 상대적인 감소의 척도로서만 의미를 가지는 것이지 정확한 수치는 아니다.

○ 분석방향 IV-4 : 부설용접된 편연결 수직재에 대한 브래킷 설치의 영향에 대한 분석

분석조건> 부설용접/유지관리 부설/설계하중/실 트럭교통량/브래킷 설치의 영향

적용데이터> - 실 S-N 기대 곡선(시험 1, 3의 피로시험 데이터로부터 추정된 평균 실 S-N 기대 곡선)

- $\alpha=0.87$ (재하시험에 의한 1차응력에 대한 실응답비)

- $\rho=0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 설계하중(DL18 설계하중)

- ADTT = 4,483(실 트럭교통량)

- $\rho=0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

분석결과>

○ 등가응력범위

- STEP 1(개통시부터 브래킷 설치시점)의 등가응력범위는 다음과 같다.

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} = 0.54(0.87)(457.80) = 215.08(\text{kg/cm}^2)$$

- STEP 2(브래킷 설치시점 이후)의 등가응력범위는 다음과 같다.

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} = 0.54(0.87)(1399.4) = 657.44(\text{kg/cm}^2)$$

○ 피로수명해석

STEP 1 : 시공후 브래킷 설치전 단계

$$C = 3.281 \times 10^{14}$$

$$N_1 = C / S_{eq}^m = \frac{3.281 \times 10^{14}}{215.08^3} = 3.300 \times 10^7$$

$$N_1 = 1.95 \times 10^7$$

STEP 2 : 브래킷 설치후 단계

$$C = 3.281 \times 10^{14}$$

$$N_2 = C / S_{eq}^m = \frac{3.281 \times 10^{14}}{657.44^3} = 1.155 \times 10^6$$

$$\frac{1.95 \times 10^7}{3.30 \times 10^7} + \frac{n}{1.155 \times 10^6} = 1 \text{ 이 될 때 피로파괴된다.}$$

$$\text{즉, } n = 1.155 \times 10^6 (1 - 1.95 \times 10^7 / 3.30 \times 10^7) = 4.725 \times 10^6$$

따라서, 기대 피로파괴년한

$$Y_E = 11.92 + 4.725 \times 10^5 / (365 \times 4483) \approx 12 \text{ 년}$$

분석 평가) 부실용접된 편연결 수직재에 일반유지관리의 부실 외에 브래킷을 설치함으로써 추가된 영향에 대한 분석 결과 기대피로파괴년한이 실붕괴 15년보다 적은 12년으로서 브래킷설치가 붕

괴를 촉발하는데 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 즉, 브래킷 설치를 하지 않고 수직재 불량 용접에다 유지관리 부재만을 고려한 경우의 기대수명이 20년에 비하여 수명이 60% 수준인 12년으로 크게 단축됨을 알 수 있다. 그러나 브래킷 설치에 의한 응력이 차량하중이 아닌 온도하중에 의한 결과로 발생빈도가 다르므로 실제 상황과는 다소 차이가 있다.

○ 분석방향 IV-5 : 종합적 영향

분 석 조 건> 부실용접/ 유지관리 부실/ 과적하중/ 실 트럭교통량/ 2차
및 국부응력 효과/ 브래킷설치 영향

적용데이터> - 실 S-N 기대 곡선(시험 1, 3의 피로시험 데이터로 부터 추정한 평균 실 S-N 기대 곡선)

- $\alpha = 1.21$ (재하시험에 의한 Peak응력에 대한 실응답비)

- $\rho = 0.54$ (성수대교의 중량분포표로부터의 추정치)

- 과적하중(DL24 설계하중)

- ADTT = 4,483(기준최저 교통량)

분 석 결 과>

○ 등가응력범위

- STEP 1(개통시부터 브래킷 설치시점)의 등가응력범위는 다음과 같다.

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} = 0.54(1.21)(457.8)(1.3333) = 398.84(\text{kg/cm}^2)$$

- STEP 2(브래킷 설치시점 이후)의 등가응력범위는 다음과 같다.

$$S_{req} = \rho \alpha S_{rd} = 0.54(1.21)(1,399.4)(1.3333) = 1,219.13(\text{kg/cm}^2)$$

○ 피로수명해석

STEP 1 : 시공후 브래킷 설치전 단계

$$C = 3.281 \times 10^{14}$$

$$N_1 = C / S_{eq}^m = \frac{3.281 \times 10^{14}}{398.84^3} = 5.171 \times 10^6$$

$$N_1 = 1.95 \times 10^7$$

STEP 2 : 브래킷 설치후 단계

$$C = 3.281 \times 10^{14}$$

$$N_2 = C / S_{eq}^m = \frac{3.281 \times 10^{14}}{1219.13^3} = 1.811 \times 10^5$$

$\frac{1.95 \times 10^7}{5.171 \times 10^6} > 1$ 이 되므로 브래킷 설치 이전에 피로파괴된다.

$$Y_E = 5.171 \times 10^6 / (365 \times 4483) \approx 3 \text{ 년}$$

분석 평가> 부실용접된 편연결 수직재의 중차량의 통행과 복합적 부실로 인한 2차 및 국부응력을 고려하고 여기에다 브래킷 설치의 영향까지 고려한 최악의 경우에 대한 분석 결과 기대피로파괴년한이 3년으로서 이 결과는 단순한 S-N모델에 의한 추정값이다. 그러므로 이 수치값의 절대적인 의미보다는 상대적인 의미가 필요하므로, 이 결과는 이와같이 수직재의 부실용접 조건하에 유지관리 부실, 과적트럭 통행, 복합적 부실로 인한 2차응력 등을 모두 고려한 최악의 실 추정 상황에서 성수대교의 붕괴는 불가피했음을 나타낸다.

종합 평가> 부실용접된 편연결 수직재의 통행량의 증가와 설계, 시공, 유지관리의 복합적 부실로 인한 2차 및 국부응력 효과를 고려하고 추가로 브래킷 설치의 영향을 고려한 경우, 수직재

불량 용접 단일 요인에 대한 기대 피로파괴수명이 86년임을 감안할 때 이 값의 3.5% 수준인 3년으로 급격하게 감소됨을 알 수 있다. 그러나 이 결과는 수치값의 절대적인 의미보다는 상대적인 의미로 수직재의 부실용접 조건하에 유지관리 부실, 과적트럭 통행, 복합적 부실로 인한 2차응력 등을 모두 고려한 최악의 실 추정 상황하에서 성수대교의 붕괴는 불가피했음을 나타낸다.

라. 분석결과 요약

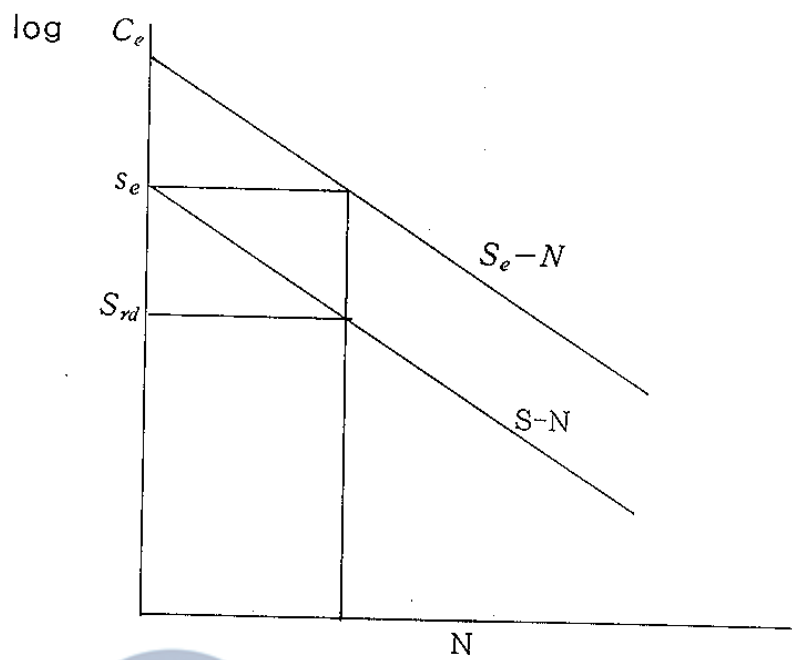
다음에 정상용접 단면에 대한 각 요인별 조건부 피로수명 해석 결과에 대하여 피로수명의 상대적인 단축의 상호비교를 쉽게 하기 위하여 (표 8-8)과 (그림 8-8)에 정리하였다. 마찬가지로, 부실용접 단면에 대한 각 요인별 조건부해석 결과의 상호 비교는 (표 8-9)와 (그림 8-9)에 정리하였다.

(표 8-8) 정상용접 단면에 대한 각 요인별 S-N선도 피로해석

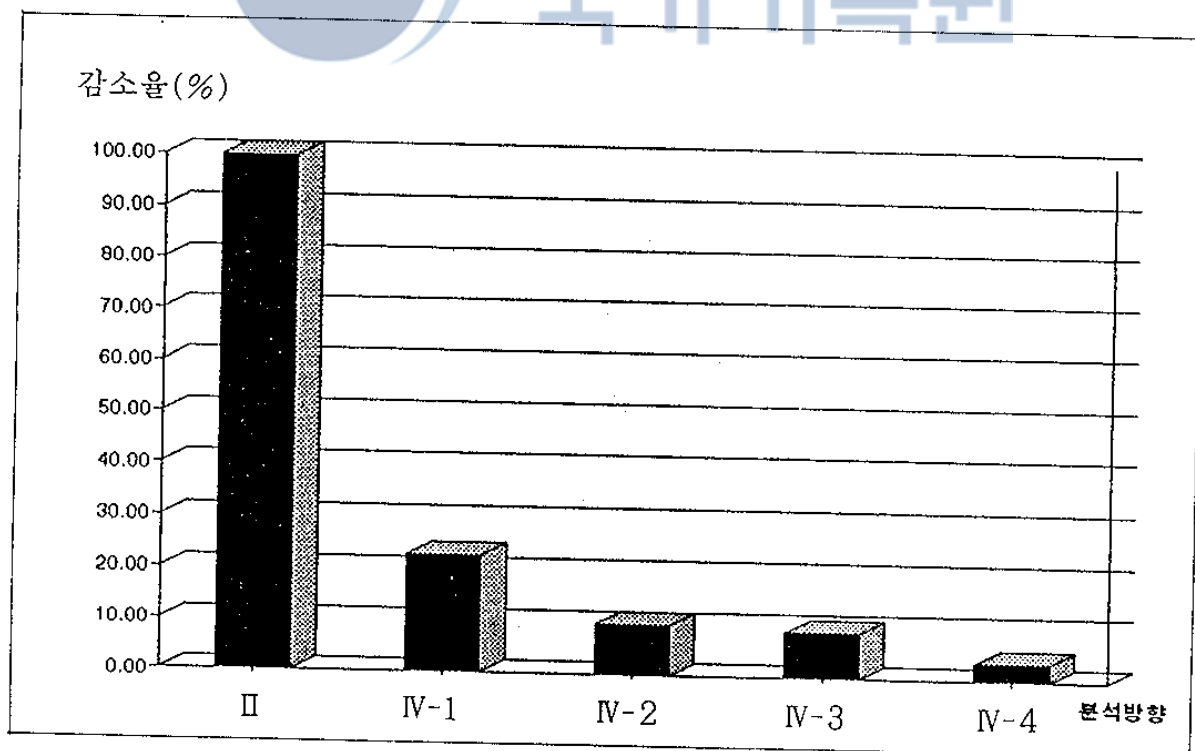
분석 방향	분 석 조 건	등가응력 범위(kg/ cm ²)	기대(평균)S-N선도에 대한 기대수명		
			평균기대 피로수명 $N(\times 10^7 \text{ cycle})$	피로기대연 한 Y_F	실용접/ 정상교 통량에 대한 기 대년한 감소율 (%), R_y
I	정상용접단면 - 기준최저트럭 교통량	90.56	9.642	10,570	100
III-1	정상용접단면 - 실추정트럭교통량	157.64	1.487	910	8.6
III-2	정상용접단면 - 실추정트럭교통량 - 초과하중(DL24)	173.4	1.079	660	6.2
III-3	정상용접단면 - 실추정트럭교통량 - 2차 및 국부응력 고려	167.95	1.201	730	6.9
III-4	정상용접단면 - 실추정트럭교통량 - 브래킷 영향 고려	369.07	0.008447	63	0.6
III-5	정상용접단면 - 실추정트럭교통량 - 초과하중 - 2차 및 국부응력 - 브래킷 영향 고려	513.30	0.002777	28	0.3

(표 8-9) 부실용접단면에 대한 각 요인별 S-N선도 피로해석

분석 방향	분 석 조 건	등 가 응 력 범 위 (kg/cm ²)	기대(평균)S-N선도에 대한 기대수명		
			평균기대 피로수명 $N(\times 10^7 \text{ cycle})$	피로기대년 한 Y_E	실용접/ 정상교통량에 대한 기대년한 감소율(%), R_Y
II	부실용접단면 -기준최저트럭 교통량	161.38	7.807	86	100
IV-1	부실용접단면 -실추정트럭교통량	214.65	3.318	20	23.26
IV-2	부실용접단면 -실추정트럭교통량 -초과하중(DL24)	286.2	1.370	8.5	9.88
IV-3	부실용접단면 -실추정트럭교통량 -2차 및 국부응력 고려	298.50	1.233	7.5	8.72
IV-4	부실용접단면 -실추정트럭교통량 -브래킷 영향 고려	657.44	0.156	12	13.95
IV-5	부실용접단면 -실추정트럭교통량 -초과하중 -2차 및 국부응력 -브래킷 영향 고려	1,219.13	0.01811	3	3.49



(그림 8-8) 정상용접/정상교통량에 대한 기대년한 감소율(%)



(그림 8-9) 부실용접/정상교통량에 대한 기대년한 감소율(%)

8-5-3 피로파괴 위험도 분석

피로파괴 위험도는 앞선 8-3절에서 기술한 바와 같이 Ang-Munse방법과 Albrecht 방법을 적용하여 상호비교를 통해 해석결과의 신뢰도를 얻도록 하였으며, 앞선 8-5-1 절에서 선정한 분석방향과 동일한 조건에 대해서 분석 고찰하였다.

가. 기본개념

○ Ang-Munse 방법

○ 피로파괴 신뢰도 $R(n)$

피로파괴 신뢰도 $R(n)$ 은 아래와 같은 식을 적용하여 구하였다. 이때, $\bar{n}$ 는 평균기대반복횟수로 앞 절의 S-N 피로수명분석에서 구한 값을 적용하였다.

$$R(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{\bar{n}}{n} \Gamma(1 + \Omega_N^{1.08}) \right]^{\Omega_N^{1.081}} \right]$$

여기서, n = 피로반복횟수 (= $365 \times \text{ADTT} \times \text{실과괴년한}$)

$\bar{n}$ = 평균기대 피로반복횟수

Γ = Gamma Function

$\Omega_N = 0.74$ (Ang-Munse 제안값)

$$\therefore \Omega_N^{1.08} = 0.7224, \quad \Omega_N^{-1.08} = 1.3843$$

$$\therefore \Gamma(1 + \Omega_N^{1.08}) = \Gamma(1.7224) = 0.9131$$

○ 피로파괴 위험도 PF

즉, 위에서 구한 피로파괴 신뢰도로 부터 다음 식을 적용하여 피로파괴 위험도를 산정하였다.

$$PF = 1 - R(n)$$

○ Albrecht 방법

Albrecht 방법에 의해 피로파괴 위험도를 구하는 과정은 아래와 같으며 Ang-Munse 방법과 동일하게 피로파괴 반복횟수 N 은 각 요인별로 S-N 피로수명분석에서 구한 값을 적용하였다. 여기서 S_r 는 피로수명과 피로 반복횟수가 갖는 통계적 불확실량을 의미하며, 본 보고서에서는 B상세에 대한 일반적인 값을 적용하였다. 보다 자세한 이론적 기술은 본 보고서 8-2절에 기술하였다.

$$○ S_r = \sqrt{(S_R)^2 + (mS'_Q)^2}$$

$$○ \beta = \frac{1}{S_r} (\log N - \log N_d)$$

$$○ \text{피로파괴 확률 } P_F = \Phi(-\beta)$$

여기서, $S_r = 0.147$ (B Category : Albrecht 제안값)

$S'_Q = \text{Slog } \rho = 0.0492$ (Albrecht가 제안한 실험 경험값)

N = 기대 피로파괴 반복횟수

N_d = ADTT에 의한 피로파괴 반복횟수

P_F = 피로파괴 확률

나. 브래킷 영향에 관한 피로신뢰성 분석 방법

한편, 브래킷 설치의 영향을 분석하는 것은 S-N방법과 유사한 개념에 의하여 다음과 같은 조건부 확률로 표현될 수 있다. 한편 이 과정에서 이차모멘트법을 기초로 하고 있는 Albrecht 방법은 실용적으로 적용하기가 어렵기 때문에 Ang-Munse 방법으로만 분석하였으며, 조건부 확률 정리에 의해 다음과 같이 구하였다.

$$P_F = \frac{P_{Ft}(n \leq n_t) - P_{Fb}(n \leq n_b)}{R_{Nb}(n = n_b)}$$

여기서, $P_{Ft}(n \leq n_t)$ = 추가 브래킷 영향만에 의한 붕괴시점의 피로파괴 확률

$P_{Fb}(n \leq n_b)$ = 브래킷 설치시점의 피로파괴 확률

$R_{Nb}(n = n_b)$ = 브래킷 설치시점의 피로신뢰도 = $1 - P_{Fb}(n \leq n_b)$

다. 분석결과 및 평가

1) 분석방향 I : 정상용접된 편연결 수직재의 기준최저교통량 및 설계하중

조건에 대한 분석

분석조건 > 정상설계용접 / 설계하중 / 기준최저교통량

○ Ang-Munse 방법

○ 피로파괴 신뢰도 $R(n)$

$$n = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 2,500 \times 15 = 1.3688 \times 10^7$$

$$\bar{n} = 9.642 \times 10^9$$

$$R(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{1.3688 \times 10^7}{9.642 \times 10^9} (0.9131) \right]^{1.3843} \right] = 0.99989$$

○ 피로파괴 위험도

$$P_F = 1 - R(n) = 1 - 0.99989 = 0.00011$$

○ Albrecht 방법

$$S_r = \sqrt{(S_R)^2 + (m \cdot S_Q)^2}$$

$$= \sqrt{0.147^2 + (3.372 \times 0.0492)^2} = 0.2217$$

$$N = 9.642 \times 10^9$$

$$\therefore \log N = 9.984$$

$$N_d = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년수} = 365 \times 2,500 \times 15 = 1.369 \times 10^7$$

$$\therefore \log N_d = 7.136$$

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{1}{S_r} \cdot (\log N - \log N_d) \\ &= \frac{1}{0.2217} \cdot (9.984 - 7.136) = 12.85 \end{aligned}$$

○ 피로파괴 위험도

$$P_F = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \approx 0$$

분석평가> 두 방법 다 피로파괴 위험도가 무시할 수 있을 정도로 지극히 낮게 나타남으로써 S-N선도에 의한 피로파괴 수명의 결과와 마찬가지로 설계하중과 기준최저교통량 하에서 정상용접의 경우에는 피로파괴에 이르지 않는다는 것을 알 수 있다.

2) 분석방향 II: 부실용접된 편연결 수직재의 설계하중 및 기준최저교통량 조건에 대한 분석

분석조건> 부실용접/ 설계하중/ 기준최저교통량

○ Ang-Munse 방법

○ 피로파괴 신뢰도 R(n)

$$n = 365 \times 2,500 \times 15 = 1.3688 \times 10^7$$

$$\bar{n} = 7.8065 \times 10^7$$

$$\begin{aligned} R(n) &= \text{Exp} \left[- \left[\frac{1.3688 \times 10^7}{7.8065 \times 10^{7(0.9131)}} \right]^{1.3843} \right] \\ &= 0.9239 \end{aligned}$$

○ 피로파괴 위험도

$$P_F = 1 - R(n) = 1 - 0.9239 = 0.0761$$

○ Albrecht 방법

$$\begin{aligned} \bullet S_r &= \sqrt{(S_R)^2 + (m \cdot S_Q)^2} \\ &= \sqrt{0.147^2 + (3 \times 0.0492)^2} = 0.2083 \end{aligned}$$

$$N = 7.8065 \times 10^7 \quad \therefore \log N = 7.892$$

$$\begin{aligned} N_d &= 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년수} = 365 \times 2,500 \times 15 \\ &= 1.396 \times 10^7 \end{aligned}$$

$$\therefore \log N_d = 7.136$$

$$\begin{aligned} \bullet \beta &= \frac{1}{S_r} \cdot (\log N - \log N_d) \\ &= \frac{1}{0.2083} \cdot (7.892 - 7.136) = 3.63 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bullet PF &= \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) = 1 - \Phi(3.63) \\ &= 1 - 0.999858 = 0.000142 \end{aligned}$$

분석 평가> 피로파괴 위험도가 양쪽 방법 모두가 낮은 것으로 나타남으로써, S-N선도에 의한 피로파괴수명의 결과와 마찬가지로 기준최저교통량 하에서 부설용접의 단독원인만으로는 피로파괴에 이르지 않는다는 것을 알 수 있다.

3) 분석방향 III : 정상설계용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실에 대한 분석

○ 분석방향 III-1 : 실 추정 트럭 교통량에 대한 영향

분석조건> 정상설계용접/설계하중/실 트럭교통량

- Ang-Munse방법

○ 피로파괴신뢰도 $R(n)$

$$n = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.4544 \times 10^7$$

$$\bar{n} = 1.079 \times 10^9$$

$$R(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{2.4544 \times 10^7}{1.079 \times 10^9} (0.9131) \right]^{1.3843} \right]$$

$$= 0.9953$$

○ 피로파괴위험도

$$P_F = 1 - R(n) = 1 - 0.9953 = 0.0047$$

○ Albrecht방법

$$S_r = \sqrt{0.147^2 + (3.372 \times 0.0492)^2} = 0.2217$$

$$N = 1.079 \times 10^9 \quad \log N = 9.033$$

$$N_d = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년수} = 365 \times 4483 \times 15$$

$$= 2.454 \times 10^7$$

$$\therefore \log N_d = 7.390$$

$$\circ \beta = \frac{1}{0.2217} \cdot (9.033 - 7.390) = 7.41$$

$$\circ P_F = \Phi(-\beta) \approx 0$$

분석평가> 피로파괴 위험도는 0.5% 로서 무시할 수 있는 수준임.

○ 분석방향 III-3 : 복합적 부실로 인한 2차응력의 영향

분석조건> 정상설계용접/설계하중/실 트럭교통량/2차 및 국부응력 효과

○ Ang-Munse방법

○ 피로파괴신뢰도 $R(n)$

$$n = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.4544 \times 10^7$$

○ 피로파괴신뢰도 $R(n)$

$$n = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.4544 \times 10^7$$

$$\bar{n} = 1.487 \times 10^9$$

$$R(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{2.4544 \times 10^7}{1.487 \times 10^9} (0.9131) \right]^{1.3843} \right]$$

$$= 0.5593$$

○ 피로파괴위험도

$$P_F = 1 - R(n) = 1 - 0.997 = 0.003$$

- Albrecht방법

$$S_r = \sqrt{0.147^2 + (3.372 \times 0.0492)^2} = 0.2217$$

$$N = 1.487 \times 10^9 \quad \log N = 9.172$$

$$N_d = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년수} = 365 \times 4,483 \times 15$$

$$= 2.454 \times 10^7$$

$$\therefore \log N_d = 7.390$$

$$\beta = \frac{1}{0.2217} \cdot (9.172 - 7.390)$$

$$= 8.04$$

$$P_F = \Phi(-\beta) \approx 0$$

분석평가> 피로파괴 위험도는 0.3% 로서 무시할 수 있는 수준임.

○ 분석방향 III-2 : 중차량의 통행증가에 대한 영향

분석조건> 정상설계용접/ 과적하중/ 실 트럭교통량

○ Ang-Munse방법

$$\bar{n} = 7.292 \times 10^9$$

$$R_{NB}(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{1.95 \times 10^7}{7.292 \times 10^9} (0.9131) \right]^{1.3843} \right] = 0.999757$$

$$n = n_t = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.4544 \times 10^7$$

$$P_{Fb} = 1 - R_{NB}(n) = 1 - 0.999757 = 2.43 \times 10^{-4}$$

$$P_{Ft} (n \leq n_t) = 1 - 999,757 = 0.0594$$

$$P_F = \frac{0.0594 - 2.42 \times 10^{-4}}{0.999758} = 0.0592$$

분석평가> 최종적인 붕괴위험도로서 브래킷을 고려하지 않은 조건이
0.4% 임을 감안하면 6%로서 붕괴는 되지는 않지만 붕괴위
험도가 브래킷을 고려할 경우 높아짐을 알 수 있다.

○ 분석방향 III-5 : 유지관리부재의 종합적 영향 분석

분석결과>

$$n = n_b = 365 \times \text{ADTT} \times 11.92 = 365 \times 4,483 \times 11.92 = 1.95 \times 10^7$$

$$\bar{n} = 9.118 \times 10^8$$

$$R_{NB}(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{1.95 \times 10^7}{9.118 \times 10^8} (0.9131) \right]^{1.3843} \right] = 0.9957$$

$$n = n$$

$$t = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.4544 \times 10^7$$

$$P_{Fb} = 1 - R_{Nb}(n) = 1 - 0.9957 = 4.3 \times 10^{-3}$$

$$F_{Ft}(n \leq n_t) = 1 - \text{Exp} \left[- \left[\frac{2.454 \times 10^7}{5.541 \times 10^7} (0.9131) \right]^{1.3843} \right]$$

$$= 0.2484$$

$$\bar{n} = 1.201 \times 10^9$$

$$R(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{2.4544 \times 10^7}{1.201 \times 10^9} (0.9131) \right]^{1.3843} \right]$$

$$= 0.99597$$

○ 피로파괴위험도

$$P_F = 1 - R(n) = 1 - 0.99597 = 0.00403$$

○ Albrecht방법

$$○ S_r = \sqrt{0.147^2 + (3.372 \times 0.0492)^2} = 0.2217$$

$$N = 1.201 \times 10^9 \quad \log N = 9.908$$

$$N_d = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년수} = 365 \times 4483 \times 15$$

$$= 2.454 \times 10^7$$

$$\therefore \log N_d = 7.390$$

$$○ \beta = \frac{1}{0.2217} \cdot (9.08 - 7.390) = 7.62$$

$$○ P_F = \Phi(-\beta) = 0$$

분석평가> 파괴확률이 0.4% 정도로서 무시할 수 있을 수준임.

○ 분석방향 III-4 : 브래킷 설치에 대한 영향

분석조건> 정상설계/설계하중/실 트럭교통량/브래킷 설치 영향

분석결과> 브래킷을 고려할 경우 다음과 같은 조건부 확률로서 고려하여야 한다.

$$P_F = \frac{P_{Ft}(n \leq n_t) - P_{Fb}(n \leq n_{tb})}{R_{Nb}(n = n_b)}$$

$$n = n_b = 365 \times \text{ADTT} \times \text{브래킷 설치 시기} = 1.95 \times 10^7$$

$$P_F = \frac{0.2404 - 4.3 \times 10^{-3}}{0.9957} = 0.2452$$

분석평가> 유지관리부재와 종합적 부실로 인한 2차응력의 영향에 브래킷의 영향을 고려한 경우 붕괴위험도가 25%로서, 피로파괴 위험도가 브래킷을 고려하지 않은 조건인 0.4% 보다 붕괴 위험도가 증가함을 알 수 있는데 이 결과로부터 브래킷의 설치가 붕괴에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

4) 분석방향 IV : 부실용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실에 대한 분석

○ 분석방향 IV-1 : 실 트럭교통량에 대한 영향

분석조건> 부실용접/ 설계하중/ 실 트럭교통량/ 유지관리부재

- Ang-Munse 방법

○ 피로파괴 신뢰도 $R(n)$

$$n = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.4544 \times 10^7$$

$$\bar{n} = 3.3175 \times 10^7$$

$$R(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{2.4544 \times 10^7}{3.3175 \times 10^7} (0.9131) \right]^{1.3843} \right] = 0.5593$$

○ 피로파괴 위험도

$$P_F = 1 - R(n) = 1 - 0.5593 = 0.4407$$

- Albrecht 방법

$$S_r = \sqrt{0.147^2 + (3 \times 0.0492)^2} = 0.2083$$

$$N = 3.3175 \times 10^7$$

$$\log N = 7.521$$

$$N_d = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년수} = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.454 \times 10^7$$

$$\therefore \log N_d = 7.390$$

$$\circ \beta = \frac{1}{0.2083} \cdot (7.521 - 7.390) = 0.63$$

$$\circ P_F = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(0.63) = 1 - 0.735653 = 0.2643$$

분석평가) 이 조건하에서는 부실용접과 유지관리 부재가 복합적으로 작용하는 경우 붕괴위험도가 44%로서 매우 위험한 수준으로 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 부실용접된 편연결 수직재에 유지관리 부실이라는 복합적인 원인이 교량을 붕괴시킨 지배적인 한 원인이었음을 보여주고 있다.

○ 분석방향 IV-2 : 중차량의 통행증가에 대한 영향

분석조건) 부실용접/과적하중/실 트럭교통량/유지관리부재

○ Ang-Munse 방법

○ 피로파괴 신뢰도 R(n)

$$\text{응답비 } \alpha = 1.658$$

$$n = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.4544 \times 10^7$$

$$\bar{n} = 4.793 \times 10^6$$

$$R(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{2.4544 \times 10^7}{4.793 \times 10^6} (0.9131) \right]^{1.3843} \right] = 0.000212$$

○ 피로파괴 위험도

$$P_F = 1 - R(n) = 1 - 0.000212 = 0.999788$$

○ Albrecht 방법

$$\circ S_r = \sqrt{(S_R)^2 + (m \cdot S_Q)^2} = 0.2083$$

$$N = 4.793 \times 10^6$$

$$\log N = 6.681$$

$$N_d = 365 \times 4483 \times 15 = 2.454 \times 10^7$$

$$\log N_d = 7.390$$

$$\begin{aligned} \circ \beta &= \frac{1}{0.2083} \cdot (6.681 - 7.390) \\ &= -3.40 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ P_F &= \Phi(-\beta) = \Phi(3.40) \\ &= 0.999663 \end{aligned}$$

분석평가> 부실용접된 편연결 수직재에 유지관리 부실과 중차량의 통행 증가에 대한 영향에 따른 피로파괴 위험도가 거의 100%로 된다. 이 결과는 위의 원인이 15년만의 붕괴에 영향을 미쳤음을 보여주고 있다.

○ 분석방향 IV-3 : 복합적 부실로 인한 2차응력의 영향

분석조건> 부실용접/설계하중/실 트럭교통량/2차 및 국부응력 효과/유지관리부재

○ Ang-Munse 방법

○ 피로파괴 신뢰도 $R(n)$

$$\text{응답비 } \alpha = 1.21$$

$$n = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.4544 \times 10^7$$

$$\bar{n} = 1.2334 \times 10^7$$

$$R(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{2.4544 \times 10^7}{1.2334 \times 10^7} (0.9131) \right]^{1.3843} \right] = 0.1017$$

○ 피로파괴 위험도

$$P_F = 1 - R(n) = 1 - 0.1017 = 0.8983$$

○ Albrecht 방법

$$○ S_r = \sqrt{(S_R)^2 + (m \cdot S_Q)^2} = 0.2083$$

$$N = 1.2334 \times 10^7 \quad \log N = 7.091$$

$$N_d = 365 \times 4483 \times 15 = 2.454 \times 10^7$$

$$\log N_d = 7.390$$

$$○ \beta = \frac{1}{0.2083} \cdot (7.091 - 7.390) = -1.44$$

$$○ P_F = \Phi(-\beta) = \Phi(1.44) = 0.925006$$

분석평가> 부실용접된 수직재에 설계, 시공, 유지관리의 복합적 부실로 인한 2차응력 및 국부응력을 고려한 Peak응답비로부터 구한 등가응력에 의한 피로파괴 위험도가 90%로서 복합적 부실로 인한 영향이 피로수명 단축에 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

○ 분석방향 IV-4 : 브래킷 설치의 영향

분석조건> 부실용접/설계하중/실 트럭교통량/2차 및 국부응력 효과/유지관리부재

$$\bar{n} = 3.30 \times 10^7$$

$$R_{nb}(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{1.95 \times 10^7}{3.3 \times 10^7} (0.9131) \right]^{1.3843} \right]$$

$$= 0.6533$$

$$P_{Fb} = 1 - R_{Nb}(n) = 1 - 0.6533 = 0.3467$$

$$n = n_t = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 4,483 \times 15 = 2.4544 \times 10^7$$

$$P_{Ft}(n \leq n_t) = 1 - \text{Exp} \left[- \left[\frac{2.454 \times 10^7}{1.155 \times 10^6} (0.9831) \right]^{1.3843} \right] \doteq 1$$

$$P_F = \frac{1 - 0.3467}{0.6533} = 1$$

분석평가) 부실용접된 편연결 수직재에 일반유지관리의 부실외에 브래킷을 설치하므로써 추가된 영향에 대한 분석 결과 피로파괴 위험도가 100%로서 브래킷설치가 붕괴를 촉발하는데 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 그러나 브래킷 설치에 의한 영향을 온도하중에 대한 해석으로서 발생빈도가 차량하중과 다르므로 최악의 경우에 대한 해석이다.

● 분석방향 IV-5 : 종합적 분석

분석조건) 부실용접/과적하중/ 실 트럭교통량/ 2차 및 국부응력 효과/ 브래킷설치 영향/ 유지관리부재

$$\bar{n} = 3.30 \times 10^7$$

$$R_{nb}(n) = \text{Exp} \left[- \left[\frac{1.95 \times 10^7}{5.171 \times 10^6} (0.9131) \right]^{1.3843} \right]$$

$$= 3.935 \times 10^{-3}$$

$$P_{Fb} = 1 - R_{nb}(n) = 1 - 0.3935 \times 10^{-3} = 0.9961$$

$$n = n_t = 365 \times \text{ADTT} \times \text{파괴년한} = 365 \times 4,483 \times 15$$

$$= 2.4544 \times 10^7$$

$$P_{Ft}(n \leq n_t) = 1 - \text{Exp} \left[- \left[\frac{2.454 \times 10^7}{1.811 \times 10^5} (0.9131) \right]^{1.3843} \right] \doteq 1$$

$$P_F = \frac{1 - 0.3467}{0.6533} = 100(\%)$$

분석 평가) 부실용접된 편연결 수직재와 과적트럭의 과도한 통행 방치에 2차 및 국부응력 효과를 고려하고 추가로 브래킷 설치의 영향에 대해 종합적으로 분석해 본 결과 붕괴위험도가 100%에 이르고 있으므로 이들 요인이 복합적으로 작용함으로써 붕괴되었음을 명백하게 알 수 있다. 앞서 기술한 S-N 피로해석의 결과와도 상응하므로 여기서는 자세한 기술한 하지 않았다.

라. 분석결과 요약

다음에 각 요인별 붕괴위험도의 상대적인 비교와 이해를 쉽게 하기 위하여 Ang-Munse 방법에 의한 피로파괴 위험도의 분석결과를 정리하였다. 즉, 정상용접 단면에 대한 각 요인별 조건부해석 결과의 상호 비교는(표 8-10)과 (그림 8-10)에 정리하였으며, 마찬가지로 부실용접 단면에 대한 각 요인별 조건부해석 결과의 비교는 (표 8-11)에 정리하였다.

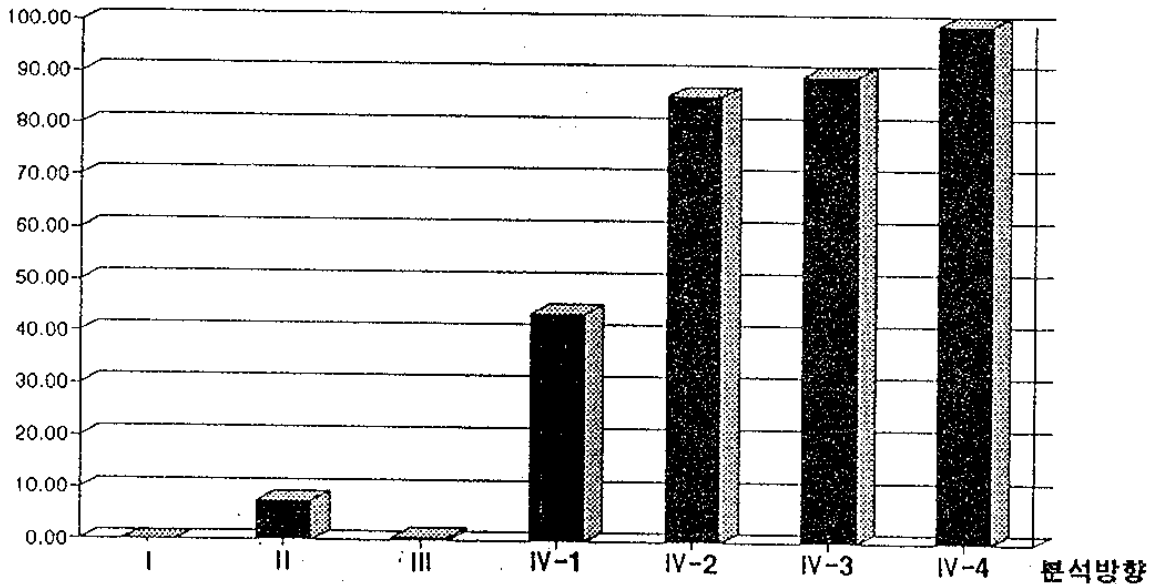
(표 8-10) 피로 파괴 위험도의 분석결과 (정상용접, Ang-Munse 방법)

분 석 방 향	분 석 조 건	등 가 응 력 범위(kg/cm ²)	평균기대 피로수명 N($\times 10^7$ cycle)	피로파괴 위험도(%)
I	정상용접단면 -기준최저트럭 교통량	90.56	9.642	0.01
Ⅲ-1	정상용접단면 -실추정트럭교통량	157.64	1.487	0.3
Ⅲ-2	정상용접단면 -실추정트럭교통량 -과적하중(DL24)	173.4	1.079	0.47
Ⅲ-3	정상용접단면 -실추정트럭교통량 -2차 및 국부응력고려	167.95	1.201	0.40
Ⅲ-4	정상용접단면 -실추정트럭교통량 -브래킷 영향 고려	369.07	0.008447	5.9
Ⅲ-5	정상용접단면 -실추정트럭교통량 -초과하중 -2차 및 국부응력 -브래킷 영향 고려	513.30	0.002777	25

(표 8-11) 피로 파괴 위험도의 분석결과 (부실용접, Ang-Munse 방법)

분 석 방 향	분석조건	등가응력 범위 (kg/cm ²)	평균기대 피로수명 N($\times 10^7$ cycle)	피로파괴 위험도(%)
II	부실용접단면 -기준최저트럭 교통량	161.38	7.807	7.6
IV-1	부실용접단면 -실추정트럭교통량	214.65	3.318	44
IV-2	부실용접단면 -실추정트럭교통량 -초과하중(DL24)	286.2	1.370	100
IV-3	부실용접단면 -실추정트럭교통량 -2차 및 국부응력고려	298.50	1.233	90
IV-4	부실용접단면 -실추정트럭교통량 -브래킷 영향 고려	657.44	0.156	100
IV-5	부실용접단면 -실추정트럭교통량 -초과하중 -2차 및 국부응력 -브래킷 영향 고려	1219.13	0.01811	100

파괴확률(%)



(그림 8-10) 피로 파괴 위험도의 분석결과 (정상용접, Ang-Munse 방법)

8-6 종합고찰

이 장에서 붕괴의 직접원인을 그간의 붕괴현장조사, 설계시공자료 검토, 재료물성시험, 비파괴시험, 피로시험, 재하시험, 교통량분석, 구조해석결과에 바탕을 두고 공인된 피로수명해석 및 붕괴위험도 분석방법에 의해 정량적으로 분석한 결과를 종합하면 다음과 같다.

이상의 분석결과, S-N피로수명 해석결과와 피로신뢰성 방법에 의한 붕괴위험도 분석 결과가 각 요인별·조건별로 동일한 수준의 붕괴위험을 나타내며, 상호 일관성 있는 결과를 주므로 분석결과를 신뢰할 수 있었음을 알 수 있었다.

- 정상설계 용접된 편연결 수직재에 설계하중과 설계기준최저교통량의 해석 조건에 대한 분석결과 등가응력범위가 피로한계치 이하이므로 피로파괴가 발생하지 않지만 피로한계치 이하로 연장된 S-N 선도상에서 피로수명을 구해보더라도 2106년으로서 설계 및 설계 트럭교통량의 조건하에서는 피

로파괴가 일어나지 않는다는 사실을 알 수 있다(붕괴위험도 : 거의 0%).

- 부실용접의 편연결 수직재에 설계 하중과 설계기준최저교통량의 해석조건에 대한 분석 결과 부실용접의 단일조건에 대한 기대 피로파괴연한이 86년이므로 실패연한인 50년에 비해 상대적으로 매우 크게 나타났기 때문에 부실용접과 최저기준 교통량 이하의 차량만이 통행한다면 붕괴가 일어날 가능성은 희박하다(붕괴위험도 : 7.6%).
- 정상설계 용접된 편연결 수직재에 유지관리 부실과 중차량의 통행증가에 대한 분석 결과 등가응력범위가 피로한계치이고 피로한계치 이하에서 연장된 S-N선도상에서 기대 피로파괴연한을 구해 보아도 4463년으로서 유지관리 부실 자체만으로는 피로파괴가 일어날 가능성은 없음을 알 수 있다(붕괴위험도: 0.4%).
- 정상설계 용접된 편연결 수직재에 중차량의 통행증가에 대한 분석 결과에서 허용응력 범위가 피로한계치 이하이며 피로한계치 이하의 연장된 S-N 선도상에서의 피로수명이 1689년으로서 피로파괴될 가능성이 없음을 알 수 있다(붕괴위험도 : 0.47%).
- 정상설계 용접된 편연결 수직재의 중트럭의 과도한 통행 방치와 브래킷 설치의 영향에 대한 분석결과 기대피로파괴연한이 115년으로서 피로파괴가 일어날 가능성은 거의 없으나 브래킷 설치를 하지 않은 조건하에서 기대수명인 1466년의 8%정도 수준으로 단축됨을 알 수 있다(붕괴위험도 : 5.9%).
- 정상설계 용접된 편연결 수직재의 중차량의 통행증가와 2차응력 및 국부응력 효과, 브래킷, 설치의 영향이 복합적으로 작용한 조건하에서 최소 기대수명이 45년으로서 피로파괴가 일어날 가능성은 희박하다. 브래킷 설치를 하지 않은 조건하에서의 기대수명인 1466년의 3%정도 수준으로

수명이 단축됨을 알 수 있고, 브래킷 설치후 과적차량 영향까지 고려한 기대수명은 실교통량 조건에 대한 기대수명 115년의 39%정도로 감소됨을 알 수 있다(붕괴위험도 : 25%).

- 부실용접된 편연결 수직재에 유지관리 부실과 중차량의 통행증가에 대한 영향에 따른 기대피로파괴연한이 8.5년으로서 15년만의 붕괴에 큰 영향을 미쳤음을 보여주고 있다(붕괴위험도 : 100%).
- 부실용접된 편연결 수직재에 중차량의 통행 증가와 브래킷 설치의 영향에 대한 분석 결과 기대피로파괴연한이 12년으로서 수명이 14%정도 수준으로 단축됨을 알 수 있다. 그러나 온도하중에 의한 브래킷의 응력발생은 차량하중에 의한 응력발생 빈도와 다르므로 최악의 경우에 대한 해석 결과이다(붕괴위험도 : 거의 100%).
- 종합적으로 평가하면, 부실용접된 편연결 수직재에 중차량의 통행증가와 복합적 부실로 인한 2차 및 국부응력을 고려하고 여기에서 브래킷 설치의 영향까지 고려한 최악의 경우에 대한 분석결과 기대피로파괴연한이 3년으로서 이 결과는 단순한 S-N모델에 의한 추정값이다. 그러나 이 수치값의 절대적인 의미보다는 상대적인 의미가 필요하므로, 이 결과는 이와 같이 수직재의 부실용접 조건하에 유지관리 부실, 과적트럭 통행, 복합적 부실로 인한 2차응력 등을 모두 고려한 최악의 실 추정 상황하에서 붕괴 위험도는 100%로서 성수대교의 붕괴는 불가피했음을 나타낸다.

결론적으로, 성수대교의 직접 붕괴원인은 원초적인 원인을 제공한 편연결 수직재의 불량용접 및 제작결함이 있는데다가 중차량통행 증가로 인하여 발생한 피로균열을 안전진단이나 육안 점검조차 없이 그대로 방치하고 있으며, 수직재에 추가 2차응력을 유발하는 가로보 보강용 브래킷 및 버팀대를 설치하는 등의 교량안전관리의 소홀로 인하여 붕괴가 일어날 수밖에 없도록 만든 유지관리의 부실은 결과적인 행위에 해당되는 것이다.

9. 붕괴 원인의 종합적 감정

9-1 개 요

이 감정 보고서에서는 붕괴현장, 설계, 시공 및 유지관리 전반에 관한 다양한 조사, 시험 및 분석에 따른 부실여부와 붕괴원인 감정 결과를 8개 장에 걸쳐 상세하게 기술하였다. 붕괴의 직접원인은 4장 5-5의 피로시험과 피로수명, 8장의 직접붕괴원인의 분석결과에서 명백하게 정량적으로 밝힌 바와 같다. 성수대교 붕괴의 지배적인 직접원인을 정성적으로 다시 기술·요약하면 다음과 같다. “성수대교 붕괴의 지배적인 직접원인은 원초적인 원인을 제공한 편연결 수직재의 불량용접 및 제작결함이 있는데다가 중차량 통행으로 인하여 발생한 피로균열을 안전진단이나 육안 점검조차 없이 그대로 방치해 왔으며, 중차량 통행까지 방치하였고 더구나, 수직재에 추가 2차응력을 유발하는 가로보 보강용 브래킷 및 버팀대를 설치하는 등의 교량안전관리의 소홀로 인하여 붕괴가 일어날 수 밖에 없도록 만든 유지관리의 부실은 결과적인 행위에 해당되는 것이다.” 그러나 무엇보다도 이러한 직접원인이 발생할 수 밖에 없도록 만든 보다 근원적인 원인으로 붕괴원인의 뿌리에 해당하는 제도적 원인과 토양에 해당하는 환경적인 원인도 도저히 간과할 수 없는 중요한 근본원인이다. 이장에서는 먼저 붕괴의 근본원인에 대하여 간략하게 고찰한 다음 지배적인 직접붕괴 원인과 지배적이지는 않지만 부차적으로나 간접적으로 붕괴에 영향을 미친 간접원인에 대해서도 간략하게 고찰하였다.

9-2 붕괴의 근본원인

9-2-1 제도적 원인

당시, 모든 건설공사에서 설계, 시공 및 유지관리 전반에 걸쳐 부실이 발생할 수 밖에 없었던 근본원인은 무엇보다도 제도, 관행 및 시방규정의 낙후와 불합리성에서 찾을 수 있다. 제도관련 문제점은 앞의 1장과 7-2절과 7-5절에 상술되어 있기 때문에 여기서는 붕괴에 영향을 미친 제도, 관행 및 시방규정상의 문제점 중 중요한 것만을 다시 요약하였다.

가. 제도 및 관행의 문제점

- 대형공사의 저가 입찰제도는 예정가의 60~70%정도의 텀핑수주로 인한 원천적인 부실원인을 제공하였음.
- 정부의 표준품셈 및 단가는 시장가에 비하여 터무니없이 낮아 부실공사로 보충할 수 밖에 없는 불합리한 품셈제도로 부실공사는 불가피했음.
- 하도급 제한규정은 있지만 행정력이 미치지 않아 최근까지도 주도급자는 공사만 일단 수주하면 부당한 조건으로 대부분 하도급을 주고 하도급에 또 하도급을 주는 하도급 관행과 비리로 인하여 전문경험이나 지식이 없는 부실 하도급 업자에게 실행원가에 못미치게 하도급하는 경우가 다반사였으므로 부실공사는 피할 수 없었음.
- 공사진행 과정에 설계도면과 특별시방서에 부합하도록 올바른 공법과 공정에 따라 엄격한 QC/QA를 하면서 수행되는지를 기술적으로 감독하는 감리제도가 없었고 이러한 막중한 업무를 전문지식이 없는 현장주재 공무원이 감독케한 무감리 제도하에 성수대교공사가 이루어졌음으로 부실공사를 방지할 수 없었음.

- 공사가 완공되면 대형공사에서는 반드시 준공검사 전에 구조물의 건전도를 기술적으로 엄밀히 진단해야 하는데 이러한 제도가 없었을 뿐 아니라 모든 공사에서 준공검사도 전문가가 아닌 기술직 공무원에 의해 형식적으로 처리되었음으로 부실공사를 확인할 수 없었음.
- 선진국에서는 구조물의 유지관리는 건설비의 1~2%정도로 충분한 예산을 투입하여 고도의 전문지식을 갖춘 안전진단, 유지관리 전문기관이나 용역업체에서 수행하도록 되어 있는데, 서울시의 경우는 80년대까지만 해도 유지관리의 인식이 전무하여 유지관리 예산도 선진국의 몇분의 일도 안되는데다, 대부분의 구조물 유지보수업무가 안전진단 보수·보강보다는 교량로면 재포장, 구체 재도장, 신축이음장치의 보수정도에 그치고 구조물 자체의 안전진단에 대해서는 인식도 없고 제도적인 뒷받침도 없던 실정이다. 유지보수를 수행하는 주체가 기술·기능직 공무원이라는데 근본적인 문제가 있었다. 그나마도 80년대까지는 한강상장대교량의 유지관리는 시청본부 도로관리과에서 직접 관장하다가, 동부건설사업소로 이관하게 된 것은 몇 해되지 않았다고 한다. 한 마디로 제도적으로 유지관리가 전혀 될 수 없도록 되어 있을 뿐 아니라 예산도 터무니없이 적은 데다 유지관리조직이 전문가가 아닌 일반기술직 공무원으로 되어 있었기 때문에 유지관리 부실의 근본원인이 서울시의 유지관리 제도에 있음이 자명하다.

나. 지방규정상의 문제점

- 당시, 우리나라의 강구조물의 설계, 제작, 시공관련 제반 지방서는 선진국에 비하여 상당히 낙후되어 있었고, 당시의 「용접강도로교 표준시방서」에는 일반 강거더교의 설계, 시공에 대한 기본사항은 있었으나, 성수대교와 같은 게르버트러스교의 파괴위험부재인 편연결재의 설계,

제작, 조립에 관한 상세한 시방은 없었고 피로파괴에 취약한 용접상세에 대한 피로설계규준도 없었다.

- 당시, 교량의 유지관리에 관한 지침이나 시방규정이 없었음은 물론이거니와 현행 도로교시방서에는 교량 유지관리의 일반 지침이 규정되어 있고, 80년대 후반에 건설부에서 도로교량 유지관리 지침이 제정되어 시행토록 해왔으나 최근 몇 년 사이에 대형교량 붕괴사고가 수차에 걸쳐 일어나기 전에는 유지관리규정의 이행은 고사하고 그 중요성에 대한 인식조차도 없었던 것이 사실이다.

9-2-2 환경적 원인

제도적인 근본원인 외에 직접원인인 시공과 유지관리의 부실이 발생할 수밖에 없도록 만든 중요한 환경적인 원인으로서는 정치, 사회 및 건설환경을 들 수 있다. 국가기간 간접자본 시설관련 모든 건설프로젝트의 발주, 입찰, 설계, 시공, 유지관리 전반에 걸친 총체적 부조리의 온상이었던 당시의 정치, 사회 및 건설환경에 대하여 간략하게 고찰하면 다음과 같다.

70년대는 3공치하의 유신시대로서 장기집권에 대한 국민적 불만이 팽배했던 시절인지라 장기집권으로 인한 정치적 불안에 따른 국민들의 불안을 무마하기 위하여 수차에 걸친 경제개발 5개년 계획에 따라 중화학 중심의 고도경제성장 정책을 밀어부치던 시기였다. 이에 따라 고도산업화를 위한 모든 국가 기반시설의 건설도 대 국민 전시, 홍보용이나 정권안보용 정치목적과 결부되어 무조건적 하향식의 강압적인 분위기하에 세계 어느 나라에서도 상상도 할 수 없을 정도로 정상공기의 몇분의 일도 안되는 짧은 공기에 모든 건설프로젝트를 완료하도록 무조건 닥달하는 것이 다반사였다. 더군다나, 당시는 오랜 장기 집권과 고도성장위주의 정치 경제 풍토의 후유증으로 정치, 경제, 사회 전반에 걸친 황금만능, 무사안일, 적당주의가 점차 극에

달할 정도로 국민의식이 해이되어 있던 시기였다.

전술한 바와 같이 모든 건설공사가 근본적으로 불합리하고 모순된 제도와 규정속에 이루어졌을 뿐 아니라, 이미 1-4절에서 당시의 우리 건설기술에 대하여 고찰한 바와 같이 건설 당시 상당히 낙후된 수준의 강구조 건조기술 때문에 성수대교와 같이 경험없는 대형공사는 설계, 시공 및 유지관리 모두가 부실하게 될 수 밖에 없는 실정이었으며 여기에다 혼탁한 정치·사회·환경 영향으로 지도층의 정경유착에다 공직자들의 무사안일이 만연되어 있었고, 건설기술인들의 적당주의가 팽배해져서 장인의식과 책임의식이 실종된 상황에서 각종 비리의 온상이 되었던 건설환경속에서의 성수대교의 가설은 시공 및 유지관리의 부실을 필연적으로 초래할 수 밖에 없었다. 성수대교는 당시 우리 건설기술 수준으로는 힘에 부치고 경험이 없는 특수형식의 교량이기 때문에 다른 일반 건설공사와 같이 강압적 하향식으로 무조건 무리한 돌관공사로 밀어부쳐서는 안된다는 것을 고위직 관리책임자나 기술직 공무원들이 알고 정치권의 외압을 막았어야 했음에도 불구하고, 이러한 근원적인 문제에 대한 이해나 인식조차 없던 당시 고위관리자나 기술직 공무원들의 해이한 의식과 무사안일, 적당주의적 사고가 붕괴의 근원적인 원인(遠因)이었음을 알 수 있다.

9-3 붕괴의 직접원인

성수대교 붕괴의 직접원인은 이미 4-5와 8-2에서 지금까지의 붕괴 현장 조사와 설계, 시공, 유지관리 전반에 대한 각종 조사 시험 및 분석을 통한 감정결과에 바탕을 두고 요약하였고, 8-5장에서는 피로파괴 이론에 기초하여 상세하게 여러 조건 및 요인별로 붕괴의 직접원인을 수치적으로 분석하였다. 분석 결과, 성수대교의 붕괴는 예상했던 대로 편수직재의 시공부실과

중차량의 과도한 통행과 유지관리 관련 제반 부실 요인들이 복합적으로 상 관작용하여 발생한 것으로 밝혀졌다. 여기서는 이해를 돕기 위하여 다시 한 번 붕괴의 주요 직접원인만을 종합적으로 요약 고찰하였다.

먼저, 이미 8장에서 강조한 바와 같이 파괴위험부재인 편연결 수직재의 용 접불량 및 제작결합 같은 시공부실은 원초적인 원인을 제공한 것으로 볼 수 있고, 다음, 유지관리 부실은 이러한 불량 용접된 수직재의 피로 손상을 점검·보수하지 않고 교량의 열화손상을 방치한데다 편수직재에 가로보 보수용 브래킷이나 버팀재를 설치하여 피로수명을 단축시켰을 뿐 아니라 중차량들의 통행증가에 의하여 결과적으로 붕괴를 유발시킨 원인제공 행위로 볼 수 있다.

여기서, 직접붕괴의 원인으로 설계부실을 포함시키지 않고 시공 및 유지관리 의 부실로만 국한시킨 이유는 본 성수대교의 설계는 앞의 5장에서 고찰된 바와 같이 설계하중 DL-18에 대하여 주구조체인 상판구조와 주트러스의 설 계는 근본적으로 하자가 없고, 다만 편 연결 수직재의 설계가 부적절하고 가 로보 및 2차 부재의 강성이 부족하게 설계되는 등의 경미한 문제는 있으나 붕괴의 직접원인으로 볼 수 없기 때문에 부차적인 간접원인으로 다음 절에 서 언급하였다.

9-3-1 시공부실로 인한 붕괴의 직접 원인

성수대교의 시공관련 문제점과 시공 전반에 걸친 부실 및 불량시공에 대 해서는 6장에 상술되어 있다. 시공부실 내용 중에서 이미 밝혀진 바와 같이 붕괴에 직접 영향을 미친 것은 편 연결 수직재의 용접불량이며 이는 붕괴의 원초적인 원인을 제공한 것이다.

성수대교 편 연결 수직재의 플랜지판 두께가 50mm에서 18mm로 변하

는 곳에서의 용접이 설계대로 완점용입 홈 용접으로 시공되었다면, 이 수직 부재는 (그림 4-11)의 응력변동범위와 피로수명과의 관계곡선의 피로범주 B에 해당하는 피로 저항 능력을 가지고 있기 때문에, 설계 응력 변동범위 $257.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 보다 훨씬 큰 $1,050\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 응력변동범위가 작용하여도 이론 상으로는, 이 수직부재는 무한한 피로수명을 갖는다고 할 수 있다. 그러나 용접선을 따라 파단된 면에 페인트가 묻어있는 상황이 설명하는 바와 같이, 이 수직부재는 시공 당시부터 상당한 크기의 균열이 있었고, 용접부에 내재된 균열(Embedded or Built-in Crack)을 포함하고 있도록 부설시공되어 있었다. 이렇게 부설시공된 수직부재는, 피로설계시 일반적으로 피로저항능력이 제일 나쁘다고 간주하는, 피로범주 E보다도 낮은 피로 강성을 갖고 있는 것이 피로실험에 의해 실험적인 방법으로 입증되었다. 선형파괴 역학을 이용한 이론적인 방법을 통하여 근사적으로 설명된 바와 같이, 부설시공된 수직부재는 교량이 수명을 다하지 못하고 15년이 경과한 후, 아무도 예측하지 못한, 급작스런 붕괴(Catastrophic Failure)를 가져온 직접적인 원인의 하나가 되었다.

이 값은 실제 실험의 응력작용횟수인 2.56×10^6 사이클보다 0.898×10^6 사이클만큼 크다. 이러한 차이는 실제실험에서는 플랜지가 완전히 두 부분으로 갈라지지 않는 상태에서 균열이 복부판으로 전파되어 최종 균열 크기로 성장하였지마는 이론적으로 단순화 시킬때는 이러한 상태를 고려하기가 어렵기 때문이다.

결론을 말하면 위에서 가정한 균열성장 패턴이 크게 틀리지 않았으며 이론적으로 추정된 피로수명이 실험에서 구한 수명과 근사적으로 일치하였다. 또한 이론적으로 추정된 수직부재 수명도 성수대교를 실제로 통과한 트럭통행량과 비교하여 볼 때 크게 틀리지 않았다. 이러한 점으로 볼 때 용입불량

으로 인한 용접부실이 강재피로에 대한 저항능력을 격감시켰고 성수대교 수직부재가 15년 밖에 견디지 못한 주요 원인 중의 하나임이 분명하다.

9-3-2 유지관리 부실로 인한 붕괴의 직접원인

성수대교의 유지관리상의 문제점은 7-4절에서 이미 밝힌 바와 같다. 특히 최근까지 유지관리의 중요성에 대한 인식이 원천적으로 결여되어 있었고, 이러한 상황에서 실제적인 유지관리가 불가능할 수 밖에 없게 되어 있는 행정조직 및 제도에다 예산, 전문기술, 계측 및 진단장비의 절대부족은 유지관리 부실이 불가피하도록 만든 요인들이 있다.

그러나, 8-5의 분석결과에서 이미 드러난 바와 같이 편 수직재의 시공부실의 경우와 마찬가지로 수직재가 설계대로 정상완전흡입 용접된 조건 하에서는 유지관리 부실만으로는 붕괴가 일어날 수 없음이 자명하다.

시공부실이 최초의 원초적인 붕괴 원인을 제공한 것은 움직일 수 없는 사실이지만, 아무리 부실하게 시공한 구조물이라도 준공검사때 발주기관에서 초기 구조성능과 건전도의 평가를 위한 개통전 진단 및 재하시험 등을 제대로 한다면 부실은 사후에라도 발견되어 재시공 또는 보강을 할 수 있게 마련이다. 당시는 건설 부조리가 만연되어 있었던 시절인지라 감리는 제도조차 없었고 현장 감독관의 전문지식은 감독을 할만한 수준이 되지 못하는 경우가 대부분이었으며 규정이나 제도적 장치가 허술하고 기술자들의 의식 또한 적당주의에 젖어 있었기 때문에 준공시 대부분의 경우, 제대로된 구조물의 성능 및 건전도 검사없이 형식적으로 준공검사가 되는것이 오늘날까지 계속되어 오는 우리 건설의 고질적인 병폐이다. 더구나, 법적인 하자 보증기간이 5년이나 되어 그 사이에 설계시방서의 표준설계하중이 DB/DL-18에서 DB/DL-24로 1/3이나 증가했는데도 불구하고 하자 보증기간이 끝나기 전

에 제대로 된 안전진단을 한번도 실시하지 않고, 그 이후로도 지난 15년동안 단순히 20년이 안되었다는 이유로 엄밀한 정밀 안전진단을 전혀 실시하지 않았다. 오히려 그간의 유지 보수 행위중에 교량의 안전에 역행하는, 다시말하면 교량의 붕괴에 영향을 주는 보수행위 조차 있었음이 밝혀졌다. 지난 88년 이전부터 신축이음장치의 함몰과 슬래브 단차를 가져온 가로보의 손상 탈락을 보수하는 과정에서 신축이음부 편연결 수직재에 가로보를 밀어올리기 위한 브래킷을 수직재와 연결판에 직접 용접함으로서 편거동을 억제하고 온도변화에 따른 변형을 구속함으로서 추가적인 2차 응력을 발생시켰고 더구나 수직재 하단에서 가로로 사재와 연결 구속시킨 H빔 지지대를 만들어 가로보를 받치는 버팀재를 설치함으로써 수직재의 온도변화에 대한 자유변형을 더욱 구속시켰고 이로 인하여 응력범위를 증가시킴으로써 피로수명을 단축시키는 결과를 초래하였다. 성수대교 붕괴에 영향을 미친 유지관리 측면의 주요한 부실요인은 다음과 같이 세가지로 요약할 수 있다.

- 유지관리 책임부서의 유지관리에 대한 인식결여와 예산의 절대부족, 전문 유지관리조직 및 제도의 부재와 전문기술의 부재 등으로 편 수직재의 초기 결함으로 인한 초기 취성 또는 피로 균열을 정기적인 점검, 조사 및 정밀 진단없이 그대로 붕괴시까지 방치한 구조물 안전 및 유지관리 부재 문제 :
 - 부실용접된 편연결 수직재의 유지관리 부실과 실추정트럭교통량에 대한 영향을 분석한 결과 성수대교의 유지관리 부실과 실 트럭교통량에 대하여 붕괴 파단면과 같은 부실용접에 의한 기대년한이 약 20년으로 실패 파연한인 15년과 비슷하게 나타났으며, 이 값에다 과적차량, 2차응력, 브래킷 영향 등을 부실용접과 총체적 유지관리 부실의 복합적인 원인으로 붕괴가 일어났음을 명백히 보여주었다.

- 88년 이전부터 신축이음부의 가로보 보강을 위한 편 수직재 상부 지지 브래킷의 설치 뿐 아니라 편 수직재 하단과 사재 사이를 연결 구속시킨 지지대로 가로보를 받치는 버팀재의 설치로 인한 편 구속 및 수직재 온도변화의 구속으로 인한 추가 2차 응력에 의한 피로응력 범위의 증가로 유발된 피로수명 단축 문제:
 - 부실용접된 편연결 수직재에 일반 유지관리의 부실 외에 브래킷을 설치 하므로써 추가된 영향에 대한 분석 결과 기대피로 파괴연한이 실붕괴 15년보다 적은 12년으로서 브래킷설치가 붕괴를 촉발하는데 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 그러나 브래킷 설치에 의한 응력증가가 차량하중에 의한 응력발생빈도와 크게 다른 온도하중에 의한 영향임을 고려해야 한다.
- 골재 차량을 포함한 중차량의 통행증가에 따른 피로수명 단축 문제 :
 - 부실용접된 편연결 수직재에 유지관리 부실와 중차량의 통행증가에 대한 영향에 따른 피로파괴 기대연한이 8.5년으로서, 이 결과는 과적트럭의 통행이 15년만의 붕괴에 결정인 영향을 미쳤음을 보여주고 있다. 즉, 유지관리 부실에 중차량 통행증가가 실하중 조건하 기대수명 20년의 42.5% 정도 수준으로 피로수명을 단축시켰음을 알 수 있다.

9-4 붕괴의 간접원인

앞절에서는 붕괴에 결정적인 영향을 미친 지배적인 직접원인에 대한 감정결과를 요약하였다. 이절에서는 개별적으로는 붕괴에 직접적으로 결정적인 영향을 미쳤다고 볼 수는 없지만 결과적으로는 교량의 열화손상을 가속화시키는 실응답비를 높게하고 2차응력 및 국부응력을 증가시키므로써 편연결 수직재의 피로파괴에 부차적이거나 간접적이지만 복합적으로는 지배적인 원인으로 인한

피로수명의 9% 이하로 단축시킬 정도로 상당히 큰 영향을 미친 요인들을 설계, 시공, 유지관리 전반에 걸쳐 중요한 문제만을 요약하였다.

9-4-1 설계부실 관련 간접원인

성수대교의 설계는 앞의 5장에서 설계도서를 검토하고 엄밀한 3차원 FEM 구조해석에 의해 면밀하게 검토분석한 감정결과에 따르면 당시 DL18 설계하중에 하에서는 상판구조, 트러스, 브레이싱재의 설계단면이나 설계상세 면에서는 근본적인 과오는 없는 것으로 판명되었다. 그러나, 가로보와 세로보의 연결부 상세설계, 가로보나 2차 브레이싱부재의 강성의 부족 등으로 인하여 풍하중 같은 횡하중에 의한 응력이 크게 되고, 신축 이음부의 충격으로 인하여 가로보의 손상 탈락을 비롯한 교량의 열화손상이 가속화되게 만드는 등 설계상의 부적절한 점이 적지 않다. 이는 재하시험 결과에서 밝혀진 바와 같이 2차응력이 크게되는 문제를 가져와 교량피로수명 단축에 어느정도 영향을 미친 간접적인 원인이라 할 수 있다. 설계부실과 관련되는 요인중에 가장 큰 문제는 편연결 수직재의 상세설계에 있다. 무엇보다도 편연결수직재와 같은 파괴위험부재를 편플레이트와 수직재 상단연결부에서 용접으로 처리한 것은 위험한 연결방식을 채택한 것이라고 볼 수 있다. 만일 용접연결이 아닌 고장력볼트로 연결했다면 피로파괴는 일어나지 않았을 것이다. 그리고, 편플레이트 복부상단이 편과 일체로 되지 않고 자유단으로 되어 있어 플랜지의 국부응력이 매우 크게되도록 만들 뿐아니라 편연결부위 상세설계도 편작용이 효율적으로 되지 못하게 되어있어 이로 인하여 2차 응력과 국부응력이 상당히 크게되므로 간접적으로 피로수명의 단축에 영향을 미쳤음이 8장의 분석결과를 준하여 알 수 있다. 설계부실관련 붕괴에 영향을 미친 간접원인을 요약하면 다음과 같다

- 편 연결 수직재의 상세설계가 조잡하게 된 결과 국부응력과 2차응력이 발생하여 피로수명 단축에 영향을 미침.
- 상판 지지 구조의 상세설계가 부적절하고 가로보와 2차 브레이싱 부재들의 강성이 부족하여 교량의 열화 손상을 가속시키고 2차응력을 증가시킴으로써 결과적으로 피로수명 단축에 어느정도 영향을 미쳤다고 봄.

9-4-2 시공부실관련 간접원인

시공부실 내용 중에 붕괴에 결정적으로 영향을 미친 것은 편 연결 수직재의 용접불량 및 결함임은 자명하지만, 그 외에도 다음과 같은 부실요인들이 붕괴에 크지는 않지만 간접적인 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

- 용접연결부 상부 편플레이트의 테이퍼 단면의 1/10경사 절삭각도를 지키지 않고 몇배 이상의 급테이퍼 단면으로 처리함으로써 야기시킨 응력 집중으로 인한 2차응력 증가로 피로수명에 영향을 미침.
- 가조립을 제대로 하지 않아 현장조립시 연결부의 제작오차를 무리하게 볼트접합시킴으로써 연결부 볼트의 상당수가 이완 탈락되고 수평브레이싱이 설계대로 일치 안되는 등의 문제로 구조물 열화손상을 가속화시켜 실 응답비를 증가시켜 피로에 영향을 미침.

9-4-3 유지관리 부실 관련 간접원인

전절에서 강조한 바와 같이 유지관리부실이 붕괴에 결정적인 영향을 미친 것은 근본적으로 유지관리에 대한 인식, 제도, 예산 및 기술의 부족으로 인하여 아무런 점검 진단없이 초기 피로균열의 진전을 방치할 뿐 아니라 수직재의 피로파괴로 더욱 위험하게 만드는 보수행위를 하는 등의 유지관리의 소홀에 있다.

그 외에도 직접적인 원인에서 포함시키지는 않았지만 간접적으로 붕괴에

영향을 미친 요인에는 신축이음장치의 보수문제를 들 수 있다. 신축이음장치를 제때에 적절하게 보수하지 않음으로써 슬래브 단차로 인한 통행차량에 의한 과도한 충격과 우수, 염화칼슘 등의 침투로 인하여 상판 슬래브 텍하부 부재들의 부식과 함께 가로보 등의 손상 탈락을 초래하여 수직재에 2차 응력을 증가시켜 결과적으로 교량의 열화 손상은 가속화시켰고 재하시험 결과 실응답비가 크게 나타나게 만들고 피로수명에 영향을 미쳤다고 본다.

9-5 종합고찰

이 장에서는 8장까지의 감정결과 중에서 붕괴에 영향을 미친 기술적인 면에서의 설계, 시공, 유지관리면의 부실로 인한 직·간접원인을 다시 한번 중요한 내용만 요약하였고, 아울러 기술적인 문제로 인한 원인외에 이러한 직접붕괴 원인이 발생하지 않을 수 없게 만든 근본원인을 제공한 제도규정 및 관행상의 문제점과 정치·사회·환경적인 요인도 붕괴를 촉발시킨 보다 근본적인 원인(遠因)으로 강조하는 의미에서 간략하게 언급하였다. 성수대교의 붕괴원인은 결론적으로 다음과 같이 종합적으로 요약할 수 있다.

- 성수대교의 설계·시공 당시인 70년대 중후반에는 고도성장 위주의 대국민 무마용 전시·홍보를 위해 정부의 의도대로 하향식으로 모든 사회간접자본시설의 건설을 강압적으로 밀어부치던 정치사회 환경 아래 당시 건설환경이 크게 혼탁해져 있는데다,
- 당시 우리의 건설기술이 낙후되고, 건설관련 제반제도 및 규정도 낙후되고 불비한 현실에서,
- 성수대교와 같이 붕괴에 근본적으로 취약한 게르비 연속 트러스교를 유사시에 유리하다는 이유로 채택한 후 당시 일반교량과 같은 수준의 설계, 시공기술로 공사를 돌관작업으로 밀어 부쳤으며 이로 인하여 부실시공과

수직재의 불량용접을 초래하였고,

- 제대로 기술감리나 건전도검사도 없이 준공된 후 공용하는 동안에 설계 하중이 1/3증가되었는데도 불구하고 제대로된 육안검사나, 정밀 안전진단 한번 없었고,
- 이에 따라 편수직재외 피로균열 진전을 그대로 방치하고 중차량 증가에 붕괴위험에 영향을 주는 보수행위까지 한 결과
- 편수직재의 피로균열의 진전 확대를 아무런 점검보수 없이 방치해온 결과 15년이 지나 붕괴메커니즘에 도달하는 순간 붕괴되는 참사를 초래한 것이다. 마지막으로 붕괴에 결정적인 영향을 미친 기술적인 면의 직접원인은 앞에서 언급한 바와 같이 요약·기술할 수 있다.
- 직접붕괴 원인의 정성적인 고찰
“성수대교 붕괴의 지배적인 직접원인은 원초적인 원인을 제공한 편연결 수직재의 불량용접 및 제작결함이 있는데다가 중차량 통행증가로 인하여 발생한 피로균열을 안전진단이나 육안 점검조차 없이 그대로 방치해 왔으며, 더구나, 수직재에 추가 2차 응력을 유발하는 가로보 보강용 브래킷 및 버팀대를 설치하는 등의 교량안전관리의 소홀로 인하여 붕괴가 일어날 수 밖에 없도록 만든 유지관리의 부실은 결과적인 행위에 해당되는 것이다.”
- 직접붕괴원인의 정량적인 고찰
 - 수직재가 부실용접된 경우 기준최저교통량이하의 차량만 통행했다면 기대수명이 86년이고 붕괴위험도가 7.6% 이하가 되므로 붕괴가 일어날 가능성은 희박하다.
 - 수직재의 부실용접과 과적차량 통행과 정상의 2배 정도인 과도한 실교통하중하에서는 기대수명이 20년이 되므로 15년만에 붕괴할 가능성이 상당히 높은 상태임을 알 수 있다. 즉, 시공부실 및 유지관리 부실과 중

차량의 통행증가가 붕괴의 직접적인 주원인으로 작용하여 발생한 것이다.

- 더구나, 가로보 보강을 위하여 수직재 상하단에 브래킷과 가로보지지대의 구축으로 인하여 추가로 다소 큰 2차응력이 발생하였으며, 이 영향을 포함한 실제 기대수명은 12년 이내로서 15년만의 교량 붕괴에 영향을 미쳤음을 알 수 있다.

위의 지배적인 원인외에 편수직재의 피로수명을 단축시킴으로써 성수대교의 붕괴에 영향을 미친 요인들은 다음과 같다.

- 편 연결 수직재 상세설계가 부적절하고, 가로보와 2차 브레이싱재들의 휨강성이 부족하여 열화손상이 심화되고 결과적으로 수직재 용접부의 국부응력집중과 2차 응력이 나타나게 설계되어 피로파괴 수명단축에 영향을 미쳤음.
- 편 연결 수직재의 피로손상 방지 뿐 아니라 교량의 열화손상을 그대로 방지 한 결과 교량 실용담비가 너무 크게 되어 피로파괴 수명단축의 영향을 미쳤음.
- 편 연결 수직재 상부 편플레이트와의 연결부 테이프 단면이 설계보다 급단면으로 처리되어 있어 용접부의 피로응력 증가에 어느 정도 영향을 미쳤음.
- 결론적으로 이상과 같은 편 연결 수직재의 2차응력과 국부응력으로 인한 피로수명의 감소율은 6.9%로 피로수명을 단축되게 하는 요인으로 작용하였고 이것은 설계상세 부적절, 제작상의 결함, 유지관리 부재가 공히 복합적으로 작용한 것으로 교량 붕괴에 상당한 영향을 미쳤다고 본다.

10. 결론 및 향후 대책

10-1 개 요

성수대교 붕괴의 직접적이며 근본적인 원인은 그간의 붕괴현장 조사, 설계·시공 자료검토 및 엄밀한 3-D FEM 구조분석, 물성시험, 편수직재의 실험물대 피로시험, 현장 재하시험 등의 광범위한 조사, 시험, 분석 결과를 통하여 밝혀졌고, 또한 이러한 조사, 시험분석 데이터를 바탕으로 추정되는 지배적인 직접 붕괴원인들에 대한 피로해석 및 신뢰성 이론에 기초한 피로파괴수명 및 붕괴위험도 분석결과를 통하여 밝힌 직접 붕괴원인에 대한 감정결과는 9장에 종합적으로 기술한 바와 같다. 본 보고서에서는 9개 장에 걸쳐 기술한 조사 감정결과를 바탕으로 아래에 성수대교의 붕괴원인에 대한 결론을 종합적으로 요약하였다.

10-2 종합결론

9장까지의 분석결과 성수대교 붕괴원인을 한 가지로 요약할 수 없고, 주원인에 부수적인 원인이 복합적으로 작용하여 일어난 것으로 분석된다.

직접적인 원인으로는 최초 원인을 제공한 수직재 용접 불량과 유지관리 부실이 주된 원인임이 밝혀졌다. 수직재의 용접이 제대로 되었으면 교통량 증가나 과적차량(초과하중)의 통행이 있어도 9장에서 검토한 내용에서 보면 피로응력이 허용응력내에 있을 뿐 아니라 피로시험 결과에서 나타나듯이, 피로파괴는 일어나지 않는다. 그러나 교량의 점검과 진단, 유지관리를 철저히 하여 수직재의 균열 등 결함을 사전 발견하여 근본적인 보수를 하였어도 붕괴는 일어나지 않았을 것이다.

근본적인 배경으로는 제도관행상 저가입찰, 형식적 기술평가, 기술축적 없는
신공법 도입, 무리한 공기단축, 소홀한 시방규정 등은 완벽한 시공을 보장할
수 없게 하고, 유지보수예산의 절대부족과 예산운용의 경직성, 비전문가의
유지보수직 보직과 전문가의 활용제도 미비 등 행정제도를 들 수 있다.

따라서 준공후 15년에 파괴된 원인을 아래와 같이 요약할 수 있다. 즉,
입찰, 시공제도와 관행 및 형식적인 유지 관리제도가 근본적인 배경을 제공
하고, 용접불량에 유지관리 부실이 복합적으로 작용하여 붕괴의 직접적인 원
인을 제공하였다.

10-3 행정대책

10-3-1 건설행정 체계상 대책

건설행정은 지금까지 건설위주로 이루어져 왔으며, 유지관리, 보수등의
분야는 상대적으로 적은 예산과 형식적인 조직, 비전문 인력으로 구성되어
전혀 그 기능을 발휘하지 못해 막대한 시설물이 손괴되고 있다. 따라서 향
후 행정체계는 계획, 건설분야와 동등하게 유지 관리분야도 대대적으로 확
충하고 전문인력을 양성 배치하되 계획, 건설분야보다 우대함으로써 우수한
력 확보를 기해야 한다. 즉 유지 보수관리 기술은 건설, 계획 기술보다는
고급기술에 속하기 때문이다.

10-3-2 예산상 대책

현재까지 건설행정은 전시행정의 소산 및 선거와 연관된 지방사업이라는
특성으로 가시적 성과가 없는 유지관리, 보수보다는 건설위주의 예산배정과
예산편성상 개별 사업내용과 그 수량까지 예산당국(중앙정부 : 재정경제기획
원 - 국회)의 심사를 받아 집행해야 하는 경직성으로 인해 사업 집행의 용

통성이 없을 뿐 아니라 기술내용까지 비전문가인 예산담당 공무원의 심사와 통제를 받고있는 모순을 안고 있다. 예를들면 ○○교를 가설함에 있어 기본 계획에 의해 확정된 예산으로 세부설계 집행계획을 세워 배정된 예산범위를 벗어나면 거기에 억지로 맞추어야 되는 모순이 있는가 하면 집행 잔액등의 활용을 위한 전용도 해당 부처 장관의 요청이 예산 당국의 손질(담당자 : 사무관 또는 서기관)로 간단하게 변질되는 등의 문제점이 있다. 따라서 예산을 분야별(예 국도, 고속도로, 하천개수, 댐건설등)로 요청하여 분야별 예산 배정이 되어야 해당분야의 정책 전문가와 전문기술요원의 검토를 거쳐 세부집행을 융통성 있고 효율적으로 집행할 수 있다. 이는 금번 사고의 원인을 직접적으로는 유지보수에 일부 책임을 묻고 있으나 원천적으로는 예산요구를 예산당국에서 전적으로 수용하지 않은데도 책임을 면할 수 없을진대 적어도 해당부서의 예산 세부집행은 해당부서에서 책임지고 배정 집행함으로써 책임한계를 분명히 하고 예산집행을 효율적으로 할 수 있을 것으로 본다.

10-4 기술상 대책

10-4-1 신기술 도입

선진기술도입은 건설발전을 위하여 필수 불가결한 문제이나 외국기술 도입은 반드시 우리 체질에 맞도록 소화되지 않으면 안된다. 다시 말하면 체질에 맞지 않는 생소한 음식을 적응과정을 거치지 않고 먹으면 소화불량이 되어 먹지 않음만 못한 결과를 초래하는 것이다. 모든 기술은 국민성(민족성)에 따라 발전되는 과정이 다르므로 선진기술 특히 건설부분은 신중을 기하여야 한다. 즉, 건설기술의 특성은 고급기술자가 아무리 좋은 기술을 개발해도 현장기능공과, 기술자의 손을 거치지 않으면 안되므로 그 저변 구축

을 위한 사전작업이 필요하다. 따라서 선진기술 도입시는 충분한 기반을 구축한 후 본격 도입함은 물론 최초 도입시는 다소의 시행착오를 전제로 하는 여유를 가지고 우리의 감정과 우리 국민성에 조화시킬 필요가 있으므로 과거 마구잡이식 선진기술 도입을 차제에 재검토 해야 할 것이다. 선진기술 도입은 우리 실정에 맞도록 재정리 할 것이며 기술소화를 위한 기술자, 기능공 양성등 기반조성이 필수적인 요소이다.

10-4-2 신공법 개발

신기술은 실패의 확률이 높은, 다시 말하면 실패를 전제로 개발한다고 해도 과언이 아니다. 따라서 신기술개발을 위하여는 실패도 할 수 있으며 그 실패의 원인을 분석하여 완벽한 기술을 개발할 수 있는 것이다. 그러나 우리나라는 실패는 거의 용인되지 않는 것이 일반관념처럼 되어 있다. 신기술 개발은 일종의 모험이라 할 수 있는 것이 대부분으로 그 모험이 성공하면 대단한 이익을 얻을 수 있는 것이다. 그러나 우리는 국가기관 뿐 아니라 일반기업에서도 투자와 시간을 소모하고 실패했을 경우 재고의 여지없이 책임을 묻는 풍토이므로 우리의 신기술개발은 100% 확실한 것만 시도하고 있는 것이 우리 국가기관을 비롯한 일반적인 풍토이나 이는 진정한 신기술이라 할 수 없는 것이다. 우리 사회에서 진정한 신기술이 때때로 중소기업에서 개발되는 이유는 한사람만의 의지로 가능하기 때문이며 국가기관 또는 대조직에서는 책임을 지지 않는 소극적 태도가 만연해 있는 것이 우리 기술개발의 가장 큰 장애요인으로 작용하고 있는 것이다. 이러한 풍토는 건설기술의 특성상 특히 잘 나타나고 있다. 건설기술은 최초 개발한 신공법은 일반적으로 초기에는 고가이나, 기능공과 기술자양성 그리고 자재가 개발되면서 경제성을 갖추는 것이 보통이다. 그러나 신기술개발을 위한 투자(일반공

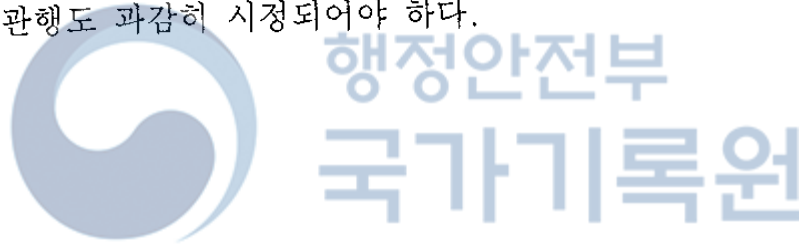
법보다 초기에 고가인 부분)를 인정치 않고 즉각 책임추궁이 따르므로 신기술적용 초기부터 일반공법보다 저렴한 가격으로 공사하게 되므로 기술축적에 장애가 될 뿐 아니라 공사 자체도 부실하게 되는 요인으로 작용하고 있다. 따라서 우리나라의 신공법 적용 사례 중 시험 시공이나 충분한 투자와 기반조성 없이 시행한 관계로 실패와 사고가 상당수 발생한 것도 필연적 결과라 할 수 있다.

10-4-3 전문기술관료 양성 및 기술분야 관리

현 공무원법은 전문직에 대한 세부 규정없이 기술부분(예. 토목, 건축, 전기등)으로만 구분되어 있을 뿐 세부 전문분야에 대한 규정이나 인사기준 등은 전혀 없다. 특히 기술직 공무원은 토목부분은 어느 자리에 누구를 담당시켜도 토목기술자면 된다는 인사권자의 고정관념과 화려한 자리만 찾는 기술공무원의 희망이 맞아 전문분야의 개념없이 무원칙한 인사 관행이 보편화 됨으로써 전문기술관료는 양성이 되지 않고 만능기술관료(비전문)만 양산한 결과로 정부 또는 지방자치단체의 전문관리 기능이 점점 취약해지고 있는 것이 현실이다. 국가기능은 전문관리자가 각기 전문분야를 관리함으로써 그 효율성이 제고되고 경쟁력이 강화되며 발전이 촉진되는 것으로 본다. 따라서 향후 전문기술관료 양성에 적극적 대처를 함은 물론 과거 관행처럼 행해진 비전문가인 행정관(예. 장관, 도지사, 시장등)이 사업 집행상의 문제가 아닌 세부기술 문제까지 관여하는 관행을 배제하고 기술문제에 관한한 전문 기술관료에 전적으로 맡겨둬와 동시에 문제 발생시는 철저한 책임 추궁을 하는 풍토조성이 이루어져야 할 것이다.

10-4-4 공사감리제도의 강화

공사감리제도가 최근 활성화 되고 있으나 책임감리를 하기 위하여는 아직도 여러가지 문제점이 있다. 즉 현장 전문 감리요원의 상주를 원칙으로 하는 제도는 전문기술자의 활용을 저해 할 뿐 아니라 경우에 따라서는 비전문 기술자만 현장에 배치하여 감리비를 낭비하는 결과만을 초래하므로 공정에 따라 전문기술자가 수시로 점검하여 실질적인 효과를 거둘 수 있도록 현장 감리요원 배치를 감리책임자의 책임하에 융통성 있게 할 수 있는 방안이 강구 되어야 하며 책임있는 감리를 위하여는 감리비와 현장 검사비등을 과감히 현실화 함은 물론, 연락관등의 명칭으로 실질적으로 감리요원을 통제하는 행정관행도 과감히 시정되어야 하다.



第3編 附 錄



행정안전부
국가기록원



행정안전부
국가기록원

[부록 1]

聖水大橋 事件 公訴狀 寫本



행정안전부
국가기록원



행정안전부
국가기록원

서울지방검찰청

()

94형제



1994. 11. 18 .

수 신 서울형사지방법원

발 신 서울지방검찰청

제 목 공 소 장

검 사 이정희, 정성복, 임상길, 김진숙, 이성운 ㉠

아래와 같이 공소를 제기합니다.

피 고 인	성 명		직 업				
	주민등록번호		연 령				
	주 거	“별지 기재와 같음”					
	본 적						
죄 명	가. 업무상과실치사 나. 업무상과실치상 다. 업무상과실일반교통방해 라. 업무상과실자동차추락						
적 용 법 조	각) 형법 제268조, 제189조 제2항, 제185조, 제187조, 제40조, 제30조.						
신 병	각 1994.11.2. 구 속						
변 호 인							
첨 부							

“ 별 지 ”

성 명	김 [REDACTED]	직 업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연 령	[REDACTED]
주 거	서울 송파구 [REDACTED]		
본 적	서울 중구 [REDACTED]		

성 명	이 [REDACTED]	직 업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연 령	[REDACTED]세
주 거	서울 양천구 [REDACTED]		
본 적	서울 중구 [REDACTED]		

성 명	김 [REDACTED]	직 업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연 령	[REDACTED]세
주 거	서울 서초구 [REDACTED]		
본 적	전남 구례군 [REDACTED]		

성 명	신 [REDACTED]	직 업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연 령	[REDACTED]세
주 거	서울 서대문구 [REDACTED]		
본 적	충남 서천군 [REDACTED]		

성명	이 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED]세
주거	서울 영등포구 [REDACTED]		
본적	부산 중구 [REDACTED]		

성명	박 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED]세
주거	경기 고양시 [REDACTED]		
본적	경남 울산군 [REDACTED]		

공 소 사 실

피고인 이■는 일정한 직업이 없는 자로서 1976. 일자미상경부터 1980. 10. 9.까지 인천시 북구 부평동 70 소재 ■■■■■ 산업주식회사 부평공장 기술 담당 상무이사로 근무하면서 동 회사가 서울시로부터 도급받아 게르버트러스공법으로 건설하는 성수대교에 소요되는 철구조물(일명 트러스, 이하 '트러스'라 한다)의 제작에 관한 사항을 전부 통괄, 감독하는 업무에 종사하던 자, 같은 박 ■■■는 일정한 직업이 없는 자로서 1977. 말경부터 1985. 7.경까지 동 공장의 생산부 부장으로 근무하면서 트러스 제작에 관하여 기술지도, 공정지도와 인원 및 장비수급계획을 수립, 시행하는 업무에 종사하던 자, 같은 신 ■■■은 건설회사인 ■■■ 주식회사를 경영하는 자로서 1977. 4. 9.부터 1979. 10. 16.까지 위 성수대교의 건설공사 현장소장으로 공사현장의 제반 업무 및 시공상의 기술적인 문제등을 총괄하던 업무를 담당하던 자, 같은 김 ■■■, 같은 김 ■■■, 같은 이 ■■■은 각 서울시청 도로과에 근무하던 자들로서 같은 김 ■■■는 1978. 6. 16.경부터 1979. 10. 16.경까지, 같은 김 ■■■는 1978. 8. 21.경부터 1979. 10. 16.경까지, 같은 이 ■■■은 1977. 7. 10.경부터 1979. 10. 16.경까지 위 공사현장에서 공사감독업무를 담당하던 공무원인 자들인 바, 1977년 당시 서울시는 인구가 약 800만명에 육박하여 이미 포화상태에 이른 강북지역의 인구 집중문제 해결 및 균형있는 강남북의 지역발전을 위하여 강남지역에 대한 대대적인 재개발사업계획을 수립하고 이를 적극추진하였는 바, 그 중 가장 대표적이고 중요한 사업이 바로 같은 해 4. 9. 동아건설이 착수한 성수대교 건설공사로서, 이는 서울시의 강남북을 연결하는 중추적 교량일 뿐만 아니라 국내에서는 시공경험이 없는 게르버트러스공법의 철강구조교량이므로 위 건설공사에 참여하는 피고인들은 동 교량의 위와같은 중요성과 기능성, 그리고 완공후 약 800

만명에 달하는 서울시민등이 일상적으로 이용할 교량인 점, 게르버트러스공법 교량건설의 시공경험이 없는 점 등을 감안하여 만약 시공상의 결함이 있어 성수대교가 내구연한을 견디지 못하고 붕괴할 때에는 대형참사를 야기할 위험이 있음을 깊이 인식하여 정밀, 견고한 시공이 되도록 이에 상응하는 고도의 주의 의무를 기울일 것이 요구되었음에도 피고인들은 공동하여

1. 피고인 이■■■■, 같은 박■■■■는

1978. 7.경부터 1979. 5.경까지 위 공장에서 트러스를 제작함에 있어 게르버트러스공법에 따라 시공되는 교량은 교량위를 통과하는 차량의 하중이 용접과 볼트, 핀등에 의하여 연결되는 철강재로 지탱되는 특성이 있어 트러스를 구성하는 각 부재(상현재, 하현재, 수직재, 사재, 유재 등)의 용접이나 부재상호간의 연결의 적정여부가 교량의 역학구조에 결정적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 특히 교량에 부과되는 하중이 서스펜디드트러스(Suspended Truss, 일명 에스트러스, 이하 '에스트러스'라 한다)의 수직재에 집중되기 때문에 수직재를 정밀제작하는 것이 특히 중요한 바, 이러한 경우 피고인들은 각 트러스를 제작할 때 특별시방서와 설계도면에 따라 정밀제작되도록 하여야 하므로 특별시방서 제7조에 따라 용접공은 2개월 이상 계속 동 공장에서 용접에 종사한 자이어야 하고, 용접을 하청주어서는 아니되며, 에스트러스를 구성하는 수직재 중 상현재와 핀으로 연결하는 수직재(인장력을 받는 수직재이므로 이하 '인장수직재'라 한다)를 제작할 때에는 수직재의 윗부분으로서 두께가 51밀리미터인 핀플레이트 강판(상현재와 핀으로 연결하는 부분)과 수직재의 아래부분으로서 두께가 18밀리미터인 에이치빔플랜지 강판을 용접으로 연결하여 제작하되, 위 두 강판의 연결방법은 먼저 핀플레이트 강판의 아래 접합부분을 두께가 18밀리미터가 되도록 깎

아 내는데 응력집중현상이 발생하지 않도록 사장거리를 330밀리미터로 하여 그 경사가 1대 10의 완만한 비율을 갖도록 깎아낸 다음 이를 에이치빔 플랜지 강판과 맞대어 용접을 하고, 용접시에도 두 강판의 각 용접부분을 각 브이(V)자형으로 개선한 후 두 강판을 맞대어 엑스(X)자형으로 만들고 양쪽을 각 4회 정도 용접봉으로 용접하는 소위 엑스형 용접 방법으로 완전 용접을 하여야 하고, 유재(遊材, IDLE MEMBER)는 설계도대로 숫부분을 암부분보다 작게 만들어 온도의 변화에 따라 강재가 신축할 때 숫부분이 암부분 속에서 유동할 수 있도록 제작하여야 하고, 가로보, 브레이싱 등 각 부재는 설계도에서 정한 규격대로 제작하여야 하고, 트러스를 제작한 후에는 시공상태와 같은 모양으로 세워서 가조립을 하여 설계도대로 정밀하게 제작되었는지를 확인 후 출고하여야 하는 등 용접공들에 대한 철저한 기술 지도, 숙련공 배치 및 사후점검등을 하여야 할 업무상의 주의의무가 있음에도 이를 게을리 한 채 비용을 절감하기 위하여 트러스 제작에 필요한 용접공을 충분히 채용하지 않고 외부용접공에게 하청을 주어 용접을 하게 하였으며, 외부용접공도 충분한 인원을 동원하지 않고 공기(工期)에 맞추어 트러스를 제작하도록 독려함으로써 동 교량 에스트러스 15개의 인장수직재 대부분이 설계도면과 달리 엑스형 용접을 하지 않고 아이(I)형 용접을 하면서 용접도 충분히 하지 않아 용입부족이 되게 하는 등 용접불량을 초래하고, 특히 동 교량의 제5번 교각과 제6번 교각사이에 설치되는 에스트러스의 인장수직재를 제작하면서 핀플레이트 강판의 사장거리가 68-74밀리미터로 급경사를 이루게 깎아 내고, 핀플레이트강판의 접합부분 두께를 18밀리미터보다 더 두껍게 깎아 접합부분이 서로 일치하지 않고 턱이 지게 하여 응력집중현상을 초래하고, 용접부분을 엑스자형으로 개선하지 않고 1차 절단한 상태 그대로 맞대어 용접하였을 뿐만 아니라 용접도 양쪽을 각

1회씩만 하면서 전체용접부분의 8/18이하로 일부만 용접을 하는 등 설계도보다 수직재의 인장강도가 현저하게(8/18 이하) 떨어지도록 제작하고, 일부 유재는 숫부분이 암부분에 들어갈 수 없는 크기로 제작하고, 수평브레이싱과 대각브레이싱, 가로보의 길이를 설계도보다 짧게 제작하고, 부재의 볼트구멍의 위치나 크기를 규격에 맞지 않게 천공하는 등 트러스를 정밀제작하지 않고, 트러스 제작후 이를 시공상태와 같은 모양으로 세워서 가조립해 보지도 않은 채 시공현장에 출고한 과실로,

2. 같은 신■은

1978. 9.경부터 1979. 7.경까지 서울 성동구 성수동 소재 똑도 수원지 앞에서 위 제1항 기재와 같이 피고인 이■ 같은 박■가 제작한 위 각 트러스를 사용하여 성수대교를 시공함에 있어, 게르버트러스공법에 따라 건설되는 교량은 교량위를 통과하는 차량의 하중이 볼트나 핀, 용접에 의해 연결되는 철강재로 지탱되는 특성상 트러스를 구성하는 각 부재의 용접, 볼트에 의한 철강재의 조립, 또는 트러스와 트러스 연결의 적정여부가 교량의 역학구조에 결정적인 영향을 미치는 교량이므로 이 부분에 관하여는 특히 고도의 정밀시공이 요구되는 바, 동 교량건설의 현장소장인 피고인으로서는 우선 게르버트러스공법의 위와같은 특성을 이해하고, 기술적으로 어려운 부분에 관하여는 설계자나 전문가의 조언을 받아 충분한 지식을 습득한 다음 위 부평공장에서 제작한 트러스의 각 부재 연결부분 볼트구멍이 설계도에서 정한 규격대로 천공되었는지, 특히 트러스 구조물 중 핵심부분인 에스트러스의 인장수직재가 설계도대로 핀플레이트강판의 접합부분이 사장거리 330밀리미터로, 그 경사는 1대 10의 완만한 비율이 되도록 깎아졌는지, 핀플레이트강판의 접합부분 두께가 18밀리미터로 정확히 깎아졌는지, 각 트

러스 유재의 암,수부분 역시 설계도에서 정한 규격대로 제작되었는지등을 확인하여 만일 설계도대로 제작되지 아니한 부재가 있을 경우 이를 위 부평공장에 반품하여 다시 제작하도록 함으로써 설계도에서 정한 규격에 맞게 제작된 부재를 이용하여 트러스를 가설하여야 하고, 동 트러스 가설시에 도 설계도대로 시공이 되도록 철저히 점검, 확인을 하는 등 위 성수대교가 설계도면과 달리 부설시공될 경우 야기되는 교량의 붕괴로 인한 인명피해를 미리 방지하여야 할 업무상의 주의의무가 있고, 한편 피고인 이[]와 같은 박[]가 위 1항 기재와 같이 제작한 동 교량 제5번 교각과 제6번 교각사이에 설치될 에스트러스는 설계도와는 달리 인장수직재 편플레이트 강판의 사장거리가 급경사로 깎아져 있으며 편플레이트 강판의 접합부분 두께가 18밀리미터보다 더 두껍게 깎아져서 에이치빔플랜지 강판과 맞대어 용접시 두께가 서로 일치하지 않고 턱이 만들어져 있는 등 부실하게 제작되어 있었으므로 시공과정에서 이를 육안으로 확인만 하였더라도 그 부실 제작여부를 알 수 있었음에도 피고인 이[]와 같은 박[]가 위 트러스를 설계도대로 잘 제작하였으리라고 가볍게 믿고 이를 점검 확인하지 아니한 채 위 부실제작된 트러스를 이용하여 그대로 시공하고, 특히 트러스를 가설하는 과정에서 일부 트러스는 트러스간의 간격을 설계도보다 넓은 간격으로 가설하고, 브레이싱의 접합부는 양쪽에 각 6개씩 12개의 볼트로 연결하여야 함에도 브레이싱의 길이가 짧아 볼트 접합공의 위치가 서로 맞지 않자 양쪽에 각 2-4개의 볼트만을 사용하여 연결하거나 볼트구멍을 확장또는 재천공하여 볼트연결을 하고, 가로보역시 길이가 짧아 볼트 접합공의 위치가 서로 맞지 않자 볼트구멍을 확장, 재천공하고 가로보 끝단에 철근을 덧대어 용접하는 등으로 불량하게 연결하고, 제 4번 교각부터 제7번 교각 사이의 각 에스트러스를 양쪽 캔틸레버트러스(Cantilever Truss, 일명 씨트러스,

이하 ‘씨트러스’라 한다)에 각 연결하는 작업을 함에 있어 에스트러스의
숫부분 유재와 씨트러스 암부분 유재의 크기가 서로 맞지 않자 암부분 유
재의 윗철판을 뜯어내고 숫부분 유재를 끼운 다음 뜯어 낸 윗철판을 다시
대어 용접하는 등 시공을 부실하게 한 과실로,

3. 같은 김■■■■, 같은 김■■■■ 같은 이■■■■은

위 각 근무기간동안 위 부평공장 및 시공현장에서 위 공사의 발주청인
서울시의 현장감독공무원으로 근무하게 되었으므로 이러한 경우 현장감독
업무에 종사하는 피고인들로서는 위 성수대교는 국내 최초로 건설하는 게
르버트러스공법에 의한 대형교량공사로서 위 공법의 핵심은 트러스제작 및
가설이고 트러스제작에 있어서는 설계도에 따른 강재의 정밀한 절단 및 용
접, 가설시에는 각 부재의 정확한 조립 및 연결이 요구되므로, 위 부평공장
에서는 트러스를 제작함에 있어 특별시방서상 요구되는 자격을 갖춘 용접
공이 용접을 실시하는지 여부, 각 트러스가 설계도면 및 특별시방서대로 용
접, 제작, 조립되는지 여부를 확인하되 특히 에스트러스의 인장수직재를
제작함에 있어 편플레이트 강판 접합부분이 1대 10의 완만한 경사로 깎아
졌는지, 편플레이트 강판의 아래 접합부분 두께가 18밀리미터로 정확히 깎
아져 있는 지, 용접부분을 엑스형 개선을 하고 4회이상 용접하였는 지 여
부등을 육안 및 방사선검사등을 통하여 확인하고, 트러스의 제작완료후에는
가조립을 실시하는지 여부를 확인하여야 하며, 시공현장에서는 트러스 가설
시 각 부재의 연결부분 볼트구멍이 정밀하게 천공되었는지, 씨트러스와 에
스트러스의 연결부분인 유재의 암수부분이 제대로 맞는지 여부 등을 확인
하여 잘못된 부분이 있으면 위 회사로 하여금 시정하게 하는 등 현장감독
을 철저히 함으로써 위 성수대교가 설계도면과 달리 부실시공될 경우 야기

되는 위 교량의 붕괴로 인한 인명피해를 미리 방지하여야 할 업무상의 주의의무가 있음에도 이를 게을리 한 채 용접공의 자격확인, 방사전 검사등을 통한 용접검사, 가조립 검사, 시공과정에서의 철저한 현장확인등을 하지 아니함으로써 피고인 이■■■■, 같은 백■■■■가 위 제1항 기재와 같이 트러스를 제작함에 있어 외부에 하청을 주어 용접하게 하고, 인장수직재의 편플레이트 강판이 에이치빔플랜지 강판과 접합되는 부분의 경사를 1대 10이 아닌 약 1대 2.5 내지 1대 3 비율의 급경사로 깎아내고, 수직재 편플레이트 강판의 접합부분 두께가 18밀리미터보다 더 두껍게 깎음으로써 맞닿는 부분에 턱이 지게 하는 등 응력집중현상이 발생하게 하고, 용접방법 또한 엑스형 개선을 하지 아니한 채 아이자형 용접으로 양쪽을 각 1회씩만 용접하고 용접량도 용입부족 등으로 전체 용접량의 18분의 8 이하로 용접하는 등 설계도보다 인장강도가 현저하게(18분의 8 이하) 떨어지게 제작하고, 또한 트러스 제작후 시공상태와 같은 모양으로 가조립을 하지 않은 채 그대로 현장에 출고되게 하고, 위 시공현장에서 피고인 신■■■■이 위 제2항 기재와 같이 트러스를 가설함에 있어서도 설계도보다 넓은 간격으로 트러스를 가설하고, 브레이싱 및 가로보의 길이가 짧아 볼트구멍을 확장,또는 재천공하여 볼트연결을 하거나 철근을 덧대어 용접을 하고, 유재의 암수부분이 맞지 않아 암부분을 절단하고 숫부분을 끼운 후 다시 용접하는 등 설계도면과 달리 시공하는 것을 그대로 방치한 과실로,

성수대교의 구조상 중대한 결함을 내포하게 하고 이어 ■■■■■사업소 소장 여■■■■(1994. 11. 11. 구속기소)등 도로관리청인 동 사업소와 서울시 소속 교량관리공무원들이 교량유지관리를 부실하게 한 과실이 겹쳐, 트러스 가설 후 위 교량 제5번과 제6번 교각사이 에스트러스의 북쪽 연결부분에 있는 3개 인장수직재의 용접부분이 떨어져 나가 동 수직재들의 북부

판에 균열이 생겨 끊어지기 시작하여 일시미상경 중앙부분 에스트러스의 인장수직재 균열부분이 먼저 끊어진 후 1994. 10. 21. 07:38경 한강 상류쪽의 수직재, 한강 하류쪽 수직재의 순으로 그 균열부분이 완전히 끊어지고, 이어 동 트러스의 남쪽 연결부분에 있는 3개의 수직재도 연쇄적으로 끊어져 동 에스트러스를 포함한 상판 일체가 한강으로 떨어지면서 마침 그위를 통행하던 서울 5사 ■■■■■ 시내버스, 서울 3호 ■■■■■ 프라이드, 서울 7구 ■■■■■호 봉고, 서울 2트 ■■■■■호 세피아, 서울 3르 ■■■■■호 르망, 서울 4프 ■■■■■호 엑셀등 함께 6대의 차량이 떨어진 상판이나 한강으로 추락하게 함과 동시에 교통을 방해하고, 이로 인하여 위 버스에 타고 있던 피해자 이■■■■(■■■■■■■■■■)등 피해자 32명으로 하여금 별지 1기재와 같이 그 자리 또는 인근 병원에서 각 사망에 이르게 하고, 피해자 권복수등 17명으로 하여금 별지 2기재와 같은 각 상해를 입게 한 것이다.

()

1994. 11. 11.

발 신 서울지방검찰청

검 사 이 문 호 ㉠

피 고 인	성 명		직 업	
	주민등록번호		연 령	
	주 거	“별지 기재와 같음”		
	본 적			
죄 명	가. 업무상과실치사 나. 업무상과실치상 다. 업무상과실일반교통방해 라. 업무상과실자동차추락 마. 허위공문서작성 바. 허위작성공문서행사 사 사문서위조 아. 위조사문서행사			
적 용 법 조	각) 형법 제268조, 제189조 제2항, 제185조, 제187조, 제30조, 제40조. 3, 4, 5, 6, 7) 형법 제227조, 제229조, 제30조, 제37조, 제38조. 3, 4, 5) 형법 제231조, 제234조.			
신 병	1994.10. 23 (1-5) 구속 (6, 7) 불구속			
변 호 인				
첨 부	1. 구속영장 5통 2. 구속기간 연장결정서 5통			

“ 별 지 ”

1. 가, 나, 다,
라, 바.

성명	여 [REDACTED]	직업	([REDACTED])
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED] 세
주거	서울 강남구 [REDACTED]		
본적	서울 동대문구 [REDACTED]		

2. 가, 나, 다, 라.

성명	김 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED] 세
주거	서울 노원구 [REDACTED]		
본적	서울 성북구 [REDACTED]		

3. 가, 나, 다,
라, 마, 바.
사, 아

성명	라 [REDACTED]	직업	([REDACTED])
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED] 세
주거	광명시 하안동 [REDACTED]		
본적	정주시 정일동 [REDACTED]		

4. 가, 나, 다,
라, 마, 바.
사, 아

성명	이 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED] 세
주거	서울 동대문구 [REDACTED]		
본적	강원도 홍천군 [REDACTED]		

5. 가, 나, 다,
라, 마, 바,
사, 아

성명	정 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED]세
주거	서울 영등포구 [REDACTED]		
본적	서울 성동구 [REDACTED]		

6. 가, 나, 다,
라, 마, 바.

성명	김 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED]세
주거	서울 강동구 [REDACTED]		
본적	서울 종로구 [REDACTED]		

7. 가, 나, 다,
라, 마, 바.

성명	박 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED]세
주거	서울 성동구 [REDACTED]		
본적	서울 성동구 [REDACTED]		

공 소 사 실

피고인 여[]은 1994. 1. 13. 부터 서울시 도로국 산하 []
[]으로서 성수대교 등의 유지관리 및 보수업무를 총괄하는 자, 같은 김항
오는 같은달 18. 부터 위 []으로서 같은해 9. 27.
까지 공석인 []의 업무를 대신 처리하면서 성수대교 등의 유지관리
및 보수업무를 관리·감독한 자, 같은 나[]은 1993. 9. 15. 부터 1994.
1. 11. 까지 위 []으로서, 1994. 1. 12. 부터 같
은해 7. 27. 까지 []으로서 공석인 []의 업무를
대신 처리하면서 성수대교 등의 유지관리 및 보수업무에 종사하고, 같은달
28. 부터 []으로서 천호대교 등의 유지관리 및 보수
업무에 종사하는 자, 같은 이[]는 1993. 9. 15. 부터 1994. 1. 11. 까
지 위 []직원으로서, 같은해 1. 12. 부터 같은해 7.
27. 까지 []직원으로서 성수대교 등의 유지관리 및 보수
업무에 종사하고, 같은달 28. 부터 []직원으로서 천호대교
등의 유지관리 및 보수업무에 종사하는 자, 같은 정[]은 1991. 2. 5. 부
터 1994. 1. 11. 까지 위 []직원으로서, 같은해 1.
12. 부터 []으로서 성수대교 등의 유지관리 및 보수
업무에 종사하는 자, 같은 김[]는 1994. 7. 28. 부터 위 []
[]으로서 성수대교 등의 유지관리 및 보수업무에 종사하는
자, 같은 박[]는 같은해 7. 28. 부터 위 []
[]으로서 성수대교 등의 유지관리 및 보수업무에 종사하는 자인 바,
1. 성수대교는 1977. 4. 부터 1979. 12. 까지 2년 8개월에 걸쳐 설치된 우
리나라 최초의 게르버 트러스교량으로서 교각과 교각의 중간부분에 설치되

는 서스펜디드 트러스와 캔틸레버 트러스간의 접속부분에 하중이 집중되어 취약한 점이 있고, 그 접속부분 상판에 설치되어 있는 신축이음장치(익스팬션 조인트 : EXPANSION JOINT)가 1990년 이후 50여회나 파손되어 보수한 적이 있으며, 1993. 4. 27. 서울 강남쪽에서 강북쪽으로 두번째 서스펜디드 트러스 복단 신축이음장치의 아랫부분 (1994. 10. 21. 자 사고로 붕괴된 지점) 에 있는 크로스빔이 이탈되고 브라켓이 파손되는 등 사고가 빈발하여 교량의 구조적 하자를 감지할 수 있었고 이러한 하자로 인한 교량 자체의 붕괴위험이 충분히 예상되었을 뿐만 아니라, 실제로 위 서스펜디드 트러스의 복단 캔틸레버 트러스와의 접속부분에 있는 수직재 3개의 에이치빔과 편플레이트를 연결하는 용접부분이 시공 당시의 용접불량, 녹과 공해로 인한 부식, 그리고 설계표준트럭하중(DB)을 초과하는 차량의 반복적인 통행으로 한강상류쪽 수직재로부터 차례로 균열이 발생, 성장하고 있었음에도, 피고인들은 공동하여,

가. 피고인 여[]은,

1994. 1. 13. 부터 같은해 10. 20. 까지 성수대교에 대한 일일점검을 직접 실시하거나 부하직원들의 일일점검업무를 감독함에 있어서 일일점검은 매일 도보나 차량을 타고 순찰하면서 교량 상판의 상태와 신축이음장치 등을 육안으로 확인하여야 하며, 특히 위 교량에는 1993. 4. 27. 신축이음장치 아랫부분의 크로스빔이 이탈하는 등 사고가 발생한 직후에 위 사고지점에 작업대(일명 비계라고 함) 1개가 설치된 것을 비롯하여 모두 4개의 작업대가 교량 상판 아랫부분에 설치되어 있었으므로 필요한 경우에는 이러한 작업대를 이용하여 교량 구조물의 균열 및 부식 진행상태를 직접 점검확인하거나 직원들로 하여금 이를 점검확인하게 하

여야 함에도 불구하고 이를 게을리 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식 진행상태를 발견하지 못하고, 1994. 2. 24.에는 교량점검용 특수차량을 이용하여 성수대교에 대한 1/4분기 정기점검을 실시함에 있어서 성수대교와 같이 게르버 트러스 공법으로 만들어진 교량은 핀이나 볼트, 용접부위 등 접속부분이 취약하므로 수직재의 에이치빔과 핀플레이트를 연결하는 용접부위 등 접속부분의 균열 및 부식진행상태 등을 치밀하게 직접 점검 확인하거나 직원들로 하여금 이를 철저히 점검확인하게 하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못한 채 지나쳐 버리고, 같은날 위 동부건설사업소의 의뢰를 받고 성수대교를 점검한 공소의 정[redacted]이 같은달 하순 일자불상경 “현재의 신축이음장치(익스팬션 조인트 : EXPANSION JOINT)는 유간부 처짐 및 횡방향 파열로 인하여 트러스 교량 힌지(HINGE)부에 중차량의 충격이 집중되고 있어 장기적으로 방치시는 강교 트러스 및 교량 상판슬라브의 피로의 누적으로 인한 파손이 증대되어 차량 주행시 불안정성을 유발하게 되므로 적절한 보수가 요망된다”는 취지의 의견으로 작성한 「교량의 관 조사 검토의견서」를 동인으로부터 제출받아 성수대교에 구조적인 하자가 있어 안전진단이 필요하다는 사실을 알게 되었으므로 위 보고서를 위 1/4분기 정기점검결과 보고서에 첨부하고 서울시에 즉시 성수대교에 대한 안전진단을 요청하여야 했음에도 불구하고 별일 없을 것으로 안이하게 생각하고 이러한 조치를 취하지 아니하고, 성수대교에 대한 같은해 5. 12.의 2/4분기 및 같은해 8. 13.과 16.의 3/4분기 정기점검을 실시함에 있어서는 교량점검용 특수차량이나 이미 설치되어 있는 작업대를 이용하여 교량 상판 아래의 트러스부분을 관찰하는 등 서울특별시공공시설물안전관리규정에 규정된 27개항목에 대해 치밀하게 직접 점검확인하

거나 직원들로 하여금 이를 철저히 점검확인하게 하여야 함에도 불구하고 교량점검용 특수차량이나 작업대를 이용하지 아니하고 교량위에서 형식적으로 점검하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못한 채 지나쳐 버리고, 성수대교는 설계표준트럭하중(DB)이 18톤으로 설계되어 있으므로 총중량 32.4톤 이상의 차량이 반복적으로 통행할 경우 피로 누적으로 인한 붕괴 위험성이 높은 교량으로서 동부간선도로가 개통된 1992년부터는 위 기준을 초과하는 차량의 통행이 급증하고 있었으므로 위 교량의 안전유지를 위해서 서울시에 위 기준을 초과하는 차량의 통행제한을 요청하는 등 필요한 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이러한 조치를 취하지 아니하고 방치한 업무상 과실로,

나. 같은 김○은,

1994. 1. 18. 부터 같은해 9. 27. 까지 성수대교에 대한 일일점검을 직접 실시하거나 부하직원들의 일일점검업무를 감독함에 있어서 일일점검은 매일 도보나 차량을 타고 순찰하면서 교량 상판의 상태와 신축이음장치 등을 육안으로 확인하여야 하며, 특히 위 교량에는 1993. 4. 27. 신축이음장치 아랫부분의 크로스빔이 이탈하는 등 사고가 발생한 직후에 위 사고지점에 작업대 1개가 설치된 것을 비롯하여 모두 4개의 작업대가 교량 상판 아랫부분에 설치되어 있었으므로 필요한 경우에는 이러한 작업대를 이용하여 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 직접 점검확인하거나 직원들로 하여금 이를 점검확인하게 하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못하고, 1994. 2. 24. 에는 교량점검용 특수차량을 이용하여 성수대교에 대한 1/4분기 정기점검을 실시함에 있어서 성수대교와 같이 게르버

트러스 공법으로 만들어진 교량은 편이나 볼트, 용접부위 등 접속부분이 취약하므로 수직재의 에이치빔과 핀플레이트를 연결하는 용접부위 등 접속부분의 균열 및 부식진행상태 등을 치밀하게 직접 점검확인하거나 직원들로 하여금 이를 철저히 점검확인하게 하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못한 채 지나쳐 버리고, 성수대교에 대한 같은해 5. 12.의 2/4분기 및 같은해 8. 13.과 16.의 3/4분기 정기점검을 실시함에 있어서는 교량점검용 특수차량이나 이미 설치되어 있는 작업대를 이용하여 교량의 트러스부분을 관찰하는 등 서울특별시공공시설물안전관리규정에 규정된 27개항목에 대해 치밀하게 직접 점검확인하거나 직원들로 하여금 이를 철저히 점검확인하게 하여야 함에도 불구하고 교량점검용 특수차량이나 작업대를 이용하지 아니하고 교량위에서 형식적으로 점검하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못한 채 지나쳐 버리고, 성수대교는 설계표준트럭하중(DB)이 18톤으로 설계되어 있으므로 총중량 32.4톤 이상의 차량이 반복적으로 통행할 경우 피로누적으로 인한 붕괴 위험성이 높은 교량으로서 동부간선도로가 개통된 1992년부터는 위 기준을 초과하는 차량의 통행이 급증하고 있었으므로 위 교량의 안전유지를 위해서 서울시에 위 기준을 초과하는 차량의 통행제한을 요청하는 등 필요한 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이러한 조치를 취하지 아니하고 방치한 업무상 과실로,

다. 같은 나■■■, 같은 이■■■는,

1993. 9. 15.부터 1994. 7. 27.까지 성수대교에 대한 일일점검을 실시함에 있어서 일일점검은 매일 도보나 차량을 타고 순찰하면서 교량상판의 상태와 신축이음장치 등을 육안으로 확인하여야 하며, 특히 위 교량

1993. 4. 27. 신축이음장치 아랫부분의 크로스빔이 이탈하는 등 사고가 발생한 직후에 위 사고지점에 작업대 1개가 설치된 것을 비롯하여 모두 4개의 작업대가 교량 상판 아랫부분에 설치되어 있었으므로 필요한 경우에는 이러한 작업대를 이용하여 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 점검확인하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못하고, 1994. 2. 24.에는 교량점검용 특수차량을 이용하여 성수대교에 대한 1/4분기 정기점검을 실시함에 있어서 성수대교와 같이 게르버 트러스 공법으로 만들어진 교량은 편이나 볼트, 용접부위 등 접속부분이 취약하므로 수직재의 에이치빔과 편플레이트를 연결하는 용접부위 등 접속부분의 균열 및 부식진행상태 등을 치밀하게 점검확인하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못한 채 지나쳐 버리고, 같은날 위 동부건설사업소의 의뢰를 받고 성수대교를 점검한 공소외 정 ■■■이 같은달 하순 일자불상경 “현재의 신축이음장치(익스팬션 조인트 : EXPANSION JOINT)는 유간부 처짐 및 횡방향 파열로 인하여 트러스 교량 힌지(HINGE)부에 중차량의 충격이 집중되고 있어 장기적으로 방치시는 강교 트러스 및 교량 상판슬라브의 피로의 누적으로 인한 파손이 증대되어 차량 주행시 불안정성을 유발하게 되므로 적절한 보수가 요망된다”는 취지의 의견으로 작성한 「교량외관 조사 검토의견서」를 동인으로 부터 제출받아 성수대교에 구조적인 하자가 있어 안전진단이 필요하다는 사실을 알게 되었으므로 위 보고서를 위 1/4분기 정기점검결과 보고서에 첨부하고 서울시에 즉시 성수대교에 대한 안전진단을 요청하여야 했음에도 불구하고 별일 없을 것으로 안이하게 생각하고 이러한 조치를 취하지 아니하고, 성수대교에 대한 같은해 5. 12. 2/4분기 정기점검을 실시함에

있어서는 교량점검용 특수차량이나 이미 설치되어 있는 작업대를 이용하여 교량 상판 아래의 트러스부분을 관찰하는 등 서울특별시공공시설물안전관리규정에 규정된 27개항목에 대해 치밀하게 점검확인하여야 함에도 불구하고 교량점검용 특수차량이나 작업대를 이용하지 아니하고 교량위에서 형식적으로 점검하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못한 채 지나쳐 버리고, 성수대교는 설계표준트럭하중(DB)이 18톤으로 설계되어 있으므로 총중량 32.4톤 이상의 차량이 반복적으로 통행할 경우 피로누적으로 인한 붕괴 위험성이 높은 교량으로서 동부간선도로가 개통된 1992년부터는 위 기준을 초과하는 차량의 통행이 급증하고 있었으므로 위 교량의 안전유지를 위해서 서울시에 위 기준을 초과하는 차량의 통행제한을 요청하는 등 필요한 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이러한 조치를 취하지 아니하고 방치한 업무상 과실로,

라. 같은 정[]은,

1991. 2. 5.부터 1994. 10. 20.까지 성수대교에 대한 일일점검을 실시함에 있어서 일일점검은 매일 도보나 차량을 타고 순찰하면서 교량 상판의 상태와 신축이음장치 등을 육안으로 확인하여야 하며, 특히 위 교량에는 1993. 4. 27. 신축이음장치 아랫부분의 크로스빔이 이탈하는 등 사고가 발생한 직후에 위 사고지점에 작업대 1개가 설치된 것을 비롯하여 모두 4개의 작업대가 교량 상판 아랫부분에 설치되어 있었으므로 필요한 경우에는 이러한 작업대를 이용하여 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 점검확인하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못하고, 1994. 2. 24.에는 교량점검용 특수차량을 이용하여 성수대교에 대한 1/4분기 정기점검을 실

시험에 있어서 성수대교와 같이 게르버 트러스 공법으로 만들어진 교량은 편이나 볼트, 용접부위 등 접속부분이 취약하므로 수직재의 에이치빔과 편플레이트를 연결하는 용접부위 등 접속부분의 균열 및 부식진행상태 등을 치밀하게 점검확인하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못하고, 같은날 위 동부건설사업소의 의뢰를 받고 성수대교를 점검한 공소의 정[]이 같은달 하순 일자불상경 “현재의 신축이음장치(익스펜션 조인트 : EXPANSION JOINT)는 유간부 처짐 및 횡방향 파열로 인하여 트러스 교량 힌지(HINGE)부에 중차량의 충격이 집중되고 있어 장기적으로 방치시는 강교 트러스 및 교량 상판슬라브의 피로의 누적으로 인한 파손이 증대되어 차량주행시 불안정성을 유발하게 되므로 적절한 보수가 요망된다”는 취지의 의견으로 작성한 「교량외관 조사 검토의견서」를 동인으로부터 제출받아 성수대교에 구조적인 하자가 있어 안전진단이 필요하다는 사실을 알게 되었으므로 위 보고서를 위 1/4분기 정기점검결과 보고서에 첨부하고 서울시에 즉시 성수대교에 대한 안전진단을 요청하여야 했음에도 불구하고 별일 없을 것으로 안이하게 생각하고 이러한 조치를 취하지 아니하고, 성수대교에 대한 같은해 5. 12.의 2/4분기 및 같은해 8. 13.과 16.의 3/4분기 정기점검을 실시함에 있어서는 교량점검용 특수차량이나 이미 설치되어 있는 작업대를 이용하여 교량 상판 아래의 트러스부분을 관찰하는 등 서울특별시공공시설물안전관리규정에 규정된 27개항목에 대해 치밀하게 점검확인하여야 함에도 불구하고 교량점검용 특수차량이나 작업대를 이용하지 아니하고 교량위에서 형식적으로 점검하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못한 채 지나쳐 버리고, 성수대교는 설계표준트럭하중(DB)이 18톤으로 설계되어 있으므로 총중량 32.4

톤 이상의 차량이 반복적으로 통행할 경우 피로 누적으로 인한 붕괴 위험성이 높은 교량으로서 동부간선도로가 개통된 1992년부터는 위 기준을 초과하는 차량의 통행이 급증하고 있었으므로 위 교량의 안전유지를 위해서 서울시에 위 기준을 초과하는 차량의 통행제한을 요청하는 등 필요한 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이러한 조치를 취하지 아니하고 방치한 업무상 과실로,

마. 같은 김■■■ 같은 박■■■는,

1994. 7. 28. 부터 같은해 10. 20. 까지 성수대교에 대한 일일점검을 실시함에 있어서 일일점검은 매일 도보나 차량을 타고 순찰하면서 교량 상판의 상태와 신축이음장치 등을 육안으로 확인하여야 하며, 특히 위 교량에는 1993. 4. 27. 신축이음장치 아랫부분의 크로스빔이 이탈하는 등 사고가 발생한 직후에 위 사고지점에 작업대 1개가 설치된 것을 비롯하여 모두 4개의 작업대가 교량 상판 아랫부분에 설치되어 있었으므로 필요한 경우에는 이러한 작업대를 이용하여 교량 구조물의 균열 및 부식 진행상태를 점검확인하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못하고, 1994. 8. 13.과 8. 16. 이틀에 걸쳐 성수대교에 대한 3/4분기 정기점검을 실시함에 있어서는 성수대교와 같이 게르버 트러스 공법으로 만들어진 교량은 편이나 볼트, 용접부위 등 접속부분이 취약하므로 수직재의 에이치빔과 편플레이트를 연결하는 용접부위 등 접속부분의 균열 및 부식진행상태 등을 치밀하게 점검확인하여야 함에도 불구하고 교량점검용 특수차량이나 작업대를 이용하지 아니하고 교량위에서 형식적인 점검을 하여 위 교량 구조물의 균열 및 부식진행상태를 발견하지 못한 채 지나쳐 버리고, 성수대교는 설

계표준트럭하중(DB)이 18톤으로 설계되어 있으므로 총중량 32.4톤 이상의 차량이 반복적으로 통행할 경우 피로 누적으로 인한 붕괴 위험성이 높은 교량으로서 동부간선도로가 개통된 1992년부터는 위 기준을 초과하는 차량의 통행이 급증하고 있었으므로 위 교량의 안전유지를 위해서 서울시에 위 기준을 초과하는 차량의 통행제한을 요청하는 등 필요한 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이러한 조치를 취하지 아니하고 방치한 업무상 과실로,

서울 강남쪽에서 강북쪽으로 두번째 48미터 서스펜디드 트러스의 북쪽 접속부분에 있는 3개의 수직재중 한강상류쪽부터 순차적으로 수직재의 에이치빔과 핀플레이트를 연결하는 용접부분이 시공시의 용접불량과 심한 부식, 그리고 설계표준트럭하중을 초과하는 차량의 빈번한 통행으로 인한 피로 누적으로 균열이 발생, 성장하다가 같은해 10. 21. 07: 38경 위 균열부분이 파단됨으로써 위 서스펜디드 트러스 길이 48미터가 북단에서부터 붕괴되도록 하여 때마침 그곳을 지나던 서울 5사 []호 시내버스, 서울3호 []호 프라이드, 서울7구 []호 봉고, 서울2트 []호 세피아, 서울3르 []호 르망, 서울4프 []호 엑셀 등 차량 6대를 추락하게 함과 동시에 교통을 방해하고, 이로 인하여 위 차량에 타고 있던 피해자 이 [] 등 32명으로 하여금 별지 1기재와 같이 각 사망에 이르게 하고, 피해자 권 [] 등 17명으로 하여금 별지 2기재와 같이 각 상해를 입게 하고,

2. 같은 나■■■■, 같은 이■■■■, 같은 정■■■■은, 공모공동하여

가. 매일 일일점검을 시행하는 것처럼 가장하는 데 행사할 목적으로,

1994. 3. 22.경 서울 성동구 군자동 205에 있는 위 동부건설사업소 사무실에서 사실은 같은날 한강상의 교량 8개에 대해 일일점검을 한 사실이 없음에도 불구하고 시설 1계 일일점검일지에 피고인들이 한강상의 교량을 같은날 점검한 것처럼 허위의 내용을 기재하고 위 이■■■■, 나■■■■의 인장을 각 날인하여 공문서인 일일점검일지를 허위로 작성하고, 그무렵 이를 위 동부건설사업소 사무실에 비치하여 행사한 것을 비롯하여 그 때부터 같은해 6. 1. 까지 사이에 별지 3의 1번 기재와 같이 모두 3회에 걸쳐 위와같은 방법으로 공문서인 일일점검일지 3매를 각 허위로 작성하고, 이를 각 행사하고,

나. 같은해 2. 하순일자불상경 위 동부건설사업소 사무실에서 1/4분기 정기 점검결과보고서에 첨부할 한강상의 교량에 대한 도로시설물안전점검보고서를 작성하면서 직원들의 회식비용 등을 마련하기 위해 구조기술사인 공소의 정■■■■이 영동대교, 천호대교, 잠실대교, 한남대교에 대해 점검한 사실이 없음에도 불구하고 이를 점검한 것처럼 조작하여 동인에게 지급되는 일당을 가로채는 데 행사할 목적으로 위 정■■■■이 위 ■■■■사업소의 의뢰로 성수대교와 동호대교에 대해 점검하고 그 일당을 받기 위해 직원을 시켜 인장을 보내온 것을 기화로 위 정■■■■이 영동대교, 천호대교, 잠실대교, 한남대교에 대한 도로시설물안전점검보고서 4매에 내용이 기재되지 않은 상태에서 임의로 위 정■■■■의 인장을 각 날인한 후 불펜으로 위 각 도로시설물안전점검보고서의 미비사항란에 "상판 보수, 신축이음장치 불량" 등으로 점검시 발견한 하자를 기재하고, 조치사항란에 "94년 3

월중 시행예정” 등으로 점검시 발견한 하자에 대한 보수계획을 기재하여 위 4개 교량에 대한 위 정천양 명의의 사실증명에 관한 사문서인 도로시설물안전점검보고서 4매를 각 위조하고, 같은달 28. 이를 1/4분기 정기점검결과 보고서인 「해빙기 도로시설물 안전점검결과보고」에 첨부, 서울시에 송부하여 이를 각 행사하고,

다. 같은해 5. 하순일자불상경 위 동부건설사업소 사무실에서 2/4분기 정기점검결과보고서에 첨부할 한강상의 교량에 대한 도로시설물안전점검보고서를 작성하면서 전 나.항과 같이 행사할 목적으로 구조기술사인 공소외 성■■■■에게 동인이 서명하여 제출한 보고서에 날인한다는 구실로 동인으로부터 인장을 교부받아 위 정■■■■이 성수대교, 잠실대교에 대한 도로시설물안전점검보고서 용지 2매에 내용이 기재되지 않은 상태에서 임의로 위 성■■■■의 인장을 각 날인한 후 워드프로세서로 위 각 도로시설물안전점검보고서의 미비사항란에 “신축이음장치” 등으로 점검시 발견한 하자부분을 기재하고, 조치사항란에 “94. 5. 21. - 7. 31.”등으로 점검시 발견한 하자에 대한 보수계획을 기재하여 위 2개교량에 대한 위 성■■■■ 명의의 사실증명에 관한 사문서인 도로시설물안전점검보고서 2매를 각 위조하고, 그 무렵 이를 2/4분기 정기점검결과 보고서인 「도로시설물 정기(2/4) 안전점검 결과보고」에 첨부, 서울시에 송부하여 각 행사하고,

3. 같은 나■■■■, 같은 이■■■■는, 매일 일일점검을 시행하는 것처럼 가장하는데 행사할 목적으로, 공모공동하여,

가. 1994. 8. 19. 위 동부건설사업소에서 사실은 같은날 천호대교 등 한강상의 교량 4개에 대해 일일점검을 한 사실이 없음에도 불구하고 시설 2개 일일점검일지에 피고인들이 같은날 천호대교 등 한강상의 교량 4개를

점점한 것처럼 허위의 내용을 기재하고 위 나■■■■의 인장을 날인하여 공문서인 일일점검일지를 허위로 작성하고, 그무렵 이를 위 동부건설사업소 사무실에 비치하여 행사하고,

나. 1994. 8. 30. 위 동부건설사업소에서 사실은 같은날 천호대교 등 한강상의 교량 4개에 대해 일일점검을 한 사실이 없음에도 불구하고 시설 2개 일일점검일지에 피고인들이 같은날 한강상의 교량 4개를 점점한 것처럼 허위의 내용을 기재하고 위 나■■■■의 인장을 날인하여 공문서인 일일점검일지를 허위로 작성하고, 그무렵 이를 위 동부건설사업소 사무실에 비치하여 행사하고,

4. 같은 김■■■■ 같은 박■■■■, 같은 정■■■■은, 매일 일일점검을 시행하는 것처럼 가장하는 데 행사할 목적으로, 공모공동하여

1994. 8. 6. 위 동부건설사업소 사무실에서 사실은 같은날 성수대교 등 한강상의 교량 4개에 대해 일일점검을 한 사실이 없음에도 불구하고 시설 1개 일일점검일지에 피고인들이 같은날 한강상의 교량에 대해 일일점검을 한 것처럼 허위의 내용을 기재하고 위 김■■■■ 정■■■■의 인장을 각 날인하여 공문서인 일일점검일지를 허위로 작성하고, 그무렵 이를 위 동부건설사업소 사무실에 비치하여 행사한 것을 비롯하여 그때부터 같은해 10. 2. 까지 사이에 별지 3의 3번 기재와 같이 모두 7회에 걸쳐 위와같은 방법으로 공문서인 일일점검일지 7매를 각 허위로 작성하고, 이를 각 행사한 것이다.

별지 1 (사망자 명단)

순번	성명	성별	나이	사인	비고
1	이			비가역성쇼크	
2	이			두개골및복부파열	
3	성			비가역성쇼크의증	
4	홍			두개골파열	
5	김			급성심폐부전증의증	
6	김			호흡마비	
7	정			중증뇌좌상등	
8	박			흉부손상	
9	유			흉부손상	
10	이			두부및 흉부손상	
11	이			후두부함몰등	필리핀국적
12	이			심폐정지	
13	유			심폐정지	
14	조			뇌파열등	
15	이			중증뇌손상등	
16	이			뇌파열등	
17	김			다발성골절	
18	김			심폐기능정지	
19	박			다발성골절	
20	조			두부파열	

21	김		두개골골절	
22	백		뇌사추정	
23	장		심폐정지	
24	송		뇌파열상등	
25	이		두개골파열	
26	문		심폐기능정지	
27	최		익 사	
28	김		뇌조직대량파열상	
29	윤		익사추정	
30	지		두개골파열	
31	유		두개골파열	
32	이		두개골파열	
합계 32명				

별지 2 (부상자 명단)

순번	성명	성별	나이	상해부위	요치기간	비고
1	권				6주	
2	김				2주	
3	권				12주	
4	심				2주	
5	김				7일	
6	곽				14일	
7	강				5일	
8	김				7일	
9	도				14일	
10	이				5일	
11	이				10일	
12	김				5일	
13	윤				14일	
14	최				5일	
15	조				10일	
16	박				6주	
17	기				12주	
합 계					17명	

별지 3(일일점검일지 허위작성일자)

순번	피 고 인	기 간	허위기재일자
1	나 이 정	94.1.12. - 94.7.27.	3/22, 4/16, 6/1, (합계 3회)
2	나 이	94.7.28. - 94.10.20.	8/19, 8/30 (합계 2회)
3	김 박 정	94.7.28. - 94.10.20.	8/6, 8/30, 8/31, 9/2, 9/17, 10/1, 10/2 (합계 7회)

서울지방검찰청

()

94형제 [redacted] 호 1994. 11. 11 .

수 신 : 서울형사지방법원

발 신 서울지방검찰청

제 목 : 공 소 장

검 사 양 재 택 인

아래와 같이 공소를 제기합니다.

피 고 인	성 명		직 업	
	주민등록번호		연 령	
	주 거	"별지 기재와 같음"		
	본 적			
죄 명	가. 업무상과실치사 다. 업무상과실일반교통방해 마. 허위공문서작성 나. 업무상과실치상 라. 업무상과실자동차추락 바. 허위작성공문서행사			
적 용 법 조	1) 형법 제227조, 제229조, 제30조, 제37조, 제38조. 2) 형법 제268, 제189조 제2항, 제185조, 제187조, 제30조, 제37조, 제38조, 제40조. 3,4) 형법 제268조, 제189조 제2항, 제185조, 제187조, 제227조, 제229조, 제30조, 제37조, 제38조, 제40조.			
신 병	1,2) 1994. 10. 26 3,4) 1994. 10. 24 각 구 속			
변 호 인				
첨 부	1. 구속영장 4통. 2. 구속기간연장결정서 4통.			

“ 별 지 ”

1. 마, 바.

성명	이 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED]세
주거	서울 강남구 [REDACTED]		
본적	서울 마포구 [REDACTED]		

2. 가, 나, 다, 라.

성명	김 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED]
주거	서울 성동구 [REDACTED]		
본적	서울 성동구 [REDACTED]		

3. 가, 나, 다,
라, 마, 바.

성명	양 [REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED]세
주거	서울 서초구 [REDACTED]		
본적	충남 서천군 [REDACTED]		

4. 가, 나, 다,
라, 마, 바.

성명	[REDACTED]	직업	[REDACTED]
주민등록번호	[REDACTED]	연령	[REDACTED]
주거	서울 강동구 [REDACTED]		
본적	경남 산청군 [REDACTED]		

공 소 사 실

피고인 이 []은 1993. 12. 16.부터 1994. 10. 27.까지 서울특별시 []
[]으로 재직한 자, 같은 김 []은 1993. 3. 15.부터 1993. 9. 18.까지 서울특별시 도로국 []으로, 같은 양 []는 1993. 9. 19.부터 1994. 10. 27.까지 위 []으로 각 재직하면서 산하기관인 건설사업소 공무원들을 지휘.감독하여 한강교량등 각종 도로시설물의 유지관리업무를 총괄한 자, 같은 권 []은 1992. 9. 7.부터 1994. 10. 27.까지 []으로 재직하면서 산하기관인 건설사업소 공무원들을 지휘.감독하여 한강교량등 각종 도로시설물의 유지관리업무를 담당한 자인 바,

1. 피고인 김 [], 같은 양 [], 같은 권 []은

- 1993. 2. 25. 새정부 출범 직전 신행주대교 붕괴사고, 남해 창선대교 붕괴사고, 청주 우암상가아파트 붕괴사고 등이 발생하였고, 1993. 3. 구포 열차전복사고, 1993. 4. 지하철 4호선 청계6가 통신구 화재사고, 1993. 7. 목포행 아시아나 항공기 추락사고, 1993. 10. 서해 훼리호 침몰사고, 1994. 8. K.A.L.기 제주공항 착륙사고등 대형 안전사고가 연이어 발생하여 많은 사상자를 냄에 따라 피고인들이 위 직책에 있는 기간동안에 국민들은 한강교량의 붕괴등 대형안전사고가 또다시 발생할 것을 우려하여 사회적 긴장감이 극도로 확산.고조되고 있는 상황이었고
- 연이어 발생하고 있는 대형 안전사고를 미연에 방지하기 위하여 대통령은 1993. 10. 18. 국무회의시 서해 훼리호 참사와 관련하여, “생명의 존엄을 외면해온 우리사회의 잘못된 가치체계 및 공직사회의 만성적인 적당주의와 나태가 대형사고를 불러왔다”고 지적하면서, “앞으로 인명과 관련한

대형 안전사고에 대해서는 관계장관들에게 반드시 행정적 책임을 물겠다”고 하고, “무사안일주의와 무책임, 불성실, 적당주의를 뿌리 뽑아야만 안전사고를 근절시킬 수 있으므로 국무총리를 비롯하여 장·차관, 청장으로부터 일선 담당공무원에 이르기까지 책임행정을 철저히 엄수해 나가라”고 지시하는등 1993. 4. 27.부터 1994. 2. 22.까지 사이에 5차례에 걸쳐 교량붕괴사고등 대형사고예방대책수립을 지시하였고,

○ 국무총리는

1993. 10. 14. 국무회의시 서해 훼리호 침몰사건을 계기로 대형안전사고 예방을 위한 특별점검지시를 하면서, “점검을 철저한 현장중심으로 행하되 대형사고 특히 인명사고예상 취약부분을 선정하여 중점 실시하고, 점검결과를 기록하여 관리책임을 명확히 하고 점검의 실효성을 확보하기 위한 철저한 감사실시를 시행토록 하라”는 지시를 하였고

○ 건설부장관은

1993. 4. 12.부터 1994. 10. 18.까지 사이에 21차례에 걸쳐 붕괴위험 교량에 대한 통행제한 및 노후교량에 대한 관리를 철저히 하라는 지시를 하였고

○ 서울시장은

1993. 5. 7. 구청장회의시 “금년들어 각종사고가 전국적으로 발생하였으므로 이를 교훈삼아 각 기관별.기능별로 사고예방 비상대책 수립에 만전을 기하라”고 지시하는등 1993. 3. 10.부터 1994. 9. 23.까지 모두 51차례에 걸쳐 교량등 각급시설물에 대하여 현장점검을 철저히 하는등 안전사고 예방대책을 수립하라고 지시하였고

○ 언론보도는

M.B.C.에서 1993. 12. 19, 1994. 4. 17, 1994. 4. 24. 세차례에 걸쳐

쳐 '9시 뉴스 카메라출동'에 한강교각이 물위에 떠있다는 등의 한강교량 위험성에 관하여 보도를 한 것을 비롯하여 각종 보도매체에서 여러차례에 걸쳐 한강교량의 안전성 문제가 매우 중요하고도 시급한 현안임을 누누히 지적하여 주의를 환기시켰고

○ 국회와 서울시 의회에서도

1993. 10.경부터 1994. 10.경까지 사이에 국정감사시나 시의회 정책질 의시 국회의원과 시의원들이 여러차례에 걸쳐 한강교량의 안전상태와 향후 안전대책에 관한 질의를 하면서 한강교량의 위험성을 지적하였으므로

- 이러한 경우 한강교량의 안전관리 업무를 담당하는 서울특별시 공무원인 피고인들로서는 한강교량 전반에 관한 안전관리상의 문제점을 파악하고, 그 실태를 면밀히 점검하며, 필요한 경우에는 예산 배정을 하여 안전진단을 실시할 뿐만 아니라 산하기관인 건설사업소를 순시하거나 한강교량을 현장점검하는등 한강교량의 안전관리 및 유지에 필요한 구체적이고도 실질적인 모든 조치를 취함으로써 한강교량의 붕괴사고를 미연에 방지하여야 할 업무상 주의의무가 있음에도 불구하고, 공동하여

가. 피고인 권○○은

- 1993. 4. 28. 한강교량등 도로시설물의 보수유지를 직접 담당하고 있는 서울특별시 도로국 산하기관인 동부건설사업소로부터 손상부위를 정밀하게 촬영한 사진 11매를 첨부하여 성수대교 강남쪽에서 강북쪽으로 두번째 서스펜디드 트러스(본건 붕괴부위의 복단과 일치함)의 신축이음장치 부분 하부에 있는 크로스빔이 이탈되고 브라켓이 파손되어 교량기능유지에 문제점이 있어 긴급보수공사를 시행할 예정이고 성수대교의 신축이음장치가 다른 한강교량에 비하여 파손빈도가 월등히 많이 발생하고 있어 교량안전점검의 필요성이 인정되니 안전점검계획을 세워 시

행할 수 있도록 조치를 취해 달라는 취지의 성수대교 손상보고서를 공문으로 받았고

- 또한 1993. 4. 말경부터 같은해 5. 말경까지 사이에 서울특별시 도로국 도로시설과 사무실에서 열린 건설사업소장회의시나 수시로 당시 [REDACTED] [REDACTED] 남궁 [REDACTED] 과 위 건설사업소 [REDACTED] 김 [REDACTED]로부터 성수대교의 상판 하부 철골구조물이 이탈되어 교량기능유지에 문제가 있다는 취지의 구두보고가 여러차례 있어 피고인으로서는 성수대교의 붕괴 위험성을 충분히 예견할 수 있었으므로 위 동부건설사업소에 지시를 하여 성수대교의 안전성에 관한 정확한 실태를 파악하고 직접 현장점검을 하여 문제점을 확인하거나 외부 전문기관으로 하여금 정밀안전진단을 실시할 수 있도록 예산 배정을 해주는등 성수대교의 보수·유지관리를 위한 구체적이고도 실질적인 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리하여 도로국장등 상부에 보고도 하지 아니한 채 아무런 조치를 취하지 아니하고
- 1993. 6. 1. 위 동부건설사업소로부터 공문으로 성수대교를 정밀안전진단을 받을 수 있는 중점관리대상 시설물로 선정해 달라는 건의를 받았으므로 피고인은 위 동부건설사업소가 성수대교를 중점관리대상으로 선정해 달라고 건의한 사유와 경위등을 정확히 확인하고, 직접 성수대교에 나가 현장점검을 한 후 그 확인 결과에 따라 성수대교를 중점관리대상 시설물로 선정하는등 구체적인 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리하여 성수대교의 안전관리를 직접 담당하는 위 동부건설사업소의 건의를 성수대교가 건설된지 20년 이상된 교량이 아니라는 이유만으로 만연히 묵살하여 이를 받아들이지 아니하고
- 1993. 11. 30. 위 동부건설사업소로부터 트러스교인 성수대교에 신축

이음장치, 상판, 교각등에 하자가 자주 발생하므로 관할 교량중 우선순위 1위로 성수대교를 안전진단대상 교량으로 선정해 달라는 건의를 공문으로 받았으므로 피고인은 성수대교의 안전상의 문제가 무엇이고 그 정도가 어떠한지, 안전진단은 필요한지등 성수대교를 안전진단대상 교량으로 선정해 달라고 건의한 사유와 경위등을 구체적으로 확인하고, 그 확인결과에 따라 안전진단 대상에 포함시키는등 구체적인 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리하여 위 동부건설사업소의 안전진단 선정요청을 성수대교가 건설된지 20년 이상된 교량이 아니라는 이유만으로 만연히 묵살하여 이를 받아들이지 아니하고

- 또한 성수대교는 설계표준 트럭하중인 디비-18등급의 2등급 교량으로 설계되어 있고 러시아워시 교통용량이 적정치의 2.5배나 되므로 설계상의 허용 하중 32.4톤 이상의 차량이 반복적으로 통행할 경우 교량에 과부하가 반복적으로 걸려 교각이나 이음새, 상판 또는 철골구조물등에 균열이 생기는 등 교량에 구조적 하자가 발생할 위험성이 높을 뿐만 아니라
- 1992년에 동부간선도로가 개통되면서 위 기준을 초과하는 차량의 통행이 급증하여 성수대교가 받는 하중상의 충격이 크다는 사실을 알았으므로 성수대교의 안전관리를 위해서는 관리청인 서울특별시의 담당공무원으로서 피고인은 서울지방경찰청등에 중량 32.4톤을 초과하는 차량에 대하여는 성수대교 통행을 제한하여 달라는 협조를 구하는등 필요한 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 한 채 아무런 조치를 취하지 아니하는등의 업무상과실로 인하여

나. 피고인 김■■■은

- 1993. 4. 28. 한강교량등 도로시설물의 보수유지를 직접 담당하고 있는 서울특별시 도로국 산하기관인 동부건설사업소로부터 손상부위를 정

밀하게 촬영한 사진 11매를 첨부하여 성수대교 강남쪽에서 강북쪽으로 두번째 서스펜디드 트러스(본건 붕괴부위의 복단과 일치함)의 신축이음장치 부분 하부에 있는 크로스빔이 이탈되고 브라켓이 파손되어 교량기능유지에 문제점이 있어 긴급보수공사를 시행할 예정이고 성수대교의 신축이음장치가 다른 한강교량에 비하여 파손빈도가 월등히 많이 발생하고 있어 교량안전점검의 필요성이 인정되니 안전점검계획을 세워 시행할 수 있도록 조치를 취해 달라는 취지의 성수대교 손상보고서를 공문으로 받았고

- 또한 1993. 4.말경부터 같은해 5.말경까지 사이에 서울특별시 도로국 도로시설과 사무실에서 열린 건설사업소장회의시나 수시로 당시 [REDACTED] 남궁 [REDACTED] 과 위 건설사업소 [REDACTED] 김 [REDACTED] 로부터 성수대교의 상판 하부 철골구조물이 이탈되어 교량기능유지에 문제가 있다는 취지의 구두보고가 여러차례 있어 피고인으로서 성수대교의 붕괴위험성을 충분히 예견할 수 있었으므로 위 동부건설사업소에 지시를 하여 성수대교의 안전성에 관한 정확한 실태를 파악하고 직접 현장점검을 하여 문제점을 확인하거나 외부 전문기관으로 하여금 정밀안전진단을 실시할 수 있도록 예산배정을 해주는등 성수대교의 보수.유지관리를 위한 구체적이고도 실질적인 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리하여 도로국장등 상부에 보고도 하지 아니한 채 아무런 조치를 취하지 아니하고
- 1993. 6. 1. 위 동부건설사업소로부터 공문으로 성수대교를 정밀안전진단을 받을 수 있는 중점관리대상 시설물로 선정해 달라는 건의를 받았으므로 피고인은 위 동부건설사업소가 성수대교를 중점관리대상으로 선정해 달라고 건의한 사유와 경위등을 정확히 확인하고, 직접 성수대교

에 나가 현장점검을 한 후 그 확인결과에 따라 성수대교를 중점관리대상 시설물로 선정하는등 구체적인 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리하여 성수대교의 안전관리를 직접 담당하는 위 동부건설사업소의 건의를 성수대교가 건설된지 20년 이상된 교량이 아니라는 이유만으로 만연히 묵살하여 이를 받아들이지 아니하고

- 또한 성수대교는 설계표준 트럭하중인 디비-18등급의 2등급 교량으로 설계되어 있고 러시아워시 교통용량이 적정치의 2.5배나 되므로 설계상의 허용 하중 32.4톤 이상의 차량이 반복적으로 통행할 경우 교량에 과부하가 반복적으로 걸려 교각이나 이음새, 상판 또는 철골구조물등에 균열이 생기는 등 교량에 구조적 하자가 발생할 위험성이 높을 뿐만 아니라
- 1992년에 동부간선도로가 개통되면서 위 기준을 초과하는 차량의 통행이 급증하여 성수대교가 받는 하중상의 충격이 크다는 사실을 알았으므로 성수대교의 안전관리를 위해서는 관리청인 서울특별시의 담당공무원으로서 피고인은 서울지방경찰청등에 중량 32.4톤을 초과하는 차량에 대하여는 성수대교 통행을 제한하여 달라는 협조를 구하는등 필요한 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리한 채 아무런 조치를 취하지 아니하는 등의 업무상과실로 인하여

다. 피고인 양■는

- 피고인이 도로시설과장으로 부임한 직후인 1993. 9.-10.경 당시 위 ■■■ 남궁 ■■으로부터 수회에 걸쳐 건설사업소장회의시나 수시로 성수대교가 안전관리상의 문제점이 많다는 취지의 설명과 아울러 중점관리대상 시설물로 선정하여 정밀안전진단을 받을 수 있도록 해달라는 건의와 정밀안전진단에 필요한 예산배정 요청을 받았고, 피고인 권■■■으로부터도 수시로 성수대교가 안전관리상의 문제점이 많다는 취지

의 구두보고를 받았을 뿐만아니라 1994. 4.경 1993. 4. 28.자 위 성수대교 손상보고서에 관하여서도 구두보고를 받아 피고인으로서 성수대교의 붕괴위험성을 충분히 예견할 수 있었으므로 위 동부건설사업소에 지시를 하여 성수대교의 안전성에 관한 정확한 실태를 파악하고 직접 현장점검을 하여 문제점을 확인하거나 외부 전문기관으로 하여금 정밀안전진단을 실시할 수 있도록 예산배정을 해주는등 성수대교의 보수, 유지관리를 위한 구체적이고도 실질적인 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리한 채 아무런 조치를 취하지 아니하고

- 1993. 11. 30. 위 동부건설사업소로부터 트러스교인 성수대교에 신축이음장치, 상판, 교각등에 하자가 자주 발생하므로 관할교량중 우선순위 1위로 성수대교를 안전진단대상 교량으로 선정해 달라는 건의를 공문으로 받았으므로 피고인은 성수대교의 안전상의 문제가 무엇이고 그 정도가 어떠한지, 안전진단은 필요한지등 성수대교를 안전진단대상 교량으로 선정해 달라고 건의한 사유와 경위등을 구체적으로 확인하고, 그 확인결과에 따라 안전진단 대상에 포함시키는등 구체적인 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리하여 위 동부건설사업소의 안전진단선정 요청을 성수대교가 건설된지 20년 이상된 교량이 아니라는 이유만으로 만연히 묵살하여 이를 받아들이지 아니하고
- 또한 성수대교는 설계표준 트럭하중인 디비-18등급의 2등급 교량으로 설계되어 있고 러시아워시 교통용량이 적정치의 2.5배나 되므로 설계상의 허용하중 32.4톤 이상의 차량이 반복적으로 통행할 경우 교량에 과부하가 반복적으로 걸려 교각이나 이음새, 상판 또는 철골구조물등에 균열이 생기는등 교량에 구조적 하자가 발생할 위험성이 높을 뿐만 아니라

- 1992년에 동부간선도로가 개통되면서 위 기준을 초과하는 차량의 통행이 급증하여 성수대교가 받는 하중상의 충격이 크다는 사실을 알았으므로 성수대교의 안전관리를 위해서는 관리청인 서울특별시의 담당공무원으로서 피고인은 서울지방경찰청등에 중량 32.4톤을 초과하는 차량에 대하여는 성수대교 통행을 제한하여 달라는 협조를 구하는등 필요한 조치를 취하여야 함에도 불구하고 이를 게을리 한 채 아무런 조치를 취하지 아니하는 등의 업무상과실로 인하여
- 성수대교 강남쪽에서 강북쪽으로 두번째 48미터 서스펜디드 트러스의 북쪽 접속부분에 있는 3개의 수직재(행거)중 한강상류쪽으로부터 순차적으로 수직재의 핀플레이트와 에이치빔을 연결하는 용접부분이 시공시의 용접불량과 표준설계하중을 초과하는 차량의 빈번한 통행으로 인한 충격으로 균열이 발생, 성장하다가 1994.10.21. 07:38경 위 균열부분이 파단됨으로써 위 서스펜디드 트러스 길이 48미터가 북단에서부터 붕괴되도록 하여 때마침 승객을 싣고 그곳을 지나던 서울 5사 []호 시내버스, 서울 3호 []호 프라이드, 서울 7구 []호 봉고, 서울 2트 []호 세피아, 서울 3르 []호 르망, 서울 4프 []호 엑셀등 자동차 6대를 추락하게 함과 동시에 교통을 방해하고
- 이로 인하여 별지 1기재와 같이 피해자 이연수등 32명으로 하여금 그 자리에서 사망에 이르게 하고, 별지 2기재와 같이 피해자 권복수등 17명으로 하여금 상해를 입게 하고

2. 피고인 이 [], 동 양 [], 동 권 []은 공모하여

가.

- 1994. 2. 28.당시 대형안전사고가 잇달아 발생함에 따라 그 예방을 위

하여 국무총리실 행정조정실에서 안전사고의 소지가 있는 각 시설물 관리부서 관계관들을 소집하여 「지하시설물등 안전관리대책회의」를 개최하였고, 그 회의에서 서울특별시는 「지하시설물등 해빙기 안전사고예방 관리대책」을 보고하였는 바, 위 회의결과에 따라 주무부서인 서울특별시 민방위국장이 도로국장에게 각 시설물별 안전점검 및 그 결과를 통보해 주도록 요청하므로 피고인 이■은 각 구청 및 건설사업소에 관할 각 교량에 대한 일제안전점검 및 그 결과보고 지시를 하였고

- 위 지시에 따라 각 산하기관에서 주무부서인 도로시설과로 보고된 1994년 1/4분기 교량에 대한 일제점검결과를 그대로 취합하여 관할 307개의 교량중 성수대교를 포함한 87개의 교량에 교각균열등의 하자가 있다는 내용의 「94. 1/4분기 안전점검결과통보서」를 도로시설과장 명의로 같은해 3.8. 위 민방위국 민방위과장에게 송부하였는 바, 위 통보서의 내용이 도하 각 언론에 크게 보도되어 한강교량의 붕괴위험이 집중 거론되는등 크게 사회문제화 되자
- 향후 한강교량에 대한 안전점검결과를 사실 그대로 통보할 경우에는 또 다시 언론에 보도되어 사회문제화될 것을 염려한 나머지 하자있는 교량의 수를 대폭 줄여서 마치 서울시내 교량의 대부분은 안전관리에 있어 문제가 없는 것처럼 가장하기로 마음먹고, 이에 행사할 목적으로
- 피고인 이■은 1994. 6. 7. 서울 중구 태평로 1가 31 소재 서울시청 도로국장 사무실에서 ■ 피고인 양■로부터 관내구청 및 건설사업소에 같은 해 4.25.자로 지시하여 보고받은 1994년 2/4분기 교량에 대한 일제점검결과를 취합한 결과 성수대교가 신축이음장치에 문제가 있는등 75개의 교량에 하자가 있는 것으로 나타났다는 보고를 받고, 위 교량안전점검결과가 지난 1/4분기 안전점검결과처럼 언론

에 보도되어 다시 사회문제화될 것을 염려한 나머지 위 양■에게 하
자교량건수를 대폭 줄이라고 지시하고

- 이에 따라 위 양■는 서■인 피고인 권■에게, 같은 권■
은 위 서■인 공소의 김■에게 같은 취지로 순차 지시하고
- 위 김■은 아무런 기준도 없이 임의로 잠실대교등 21개의 교량만이
하자가 있고 성수대교를 포함한 나머지 교량은 아무런 하자가 없다는
취지로 된 도로시설과장 명의의 공문서인 「94. 2/4분기 안전점검결과통
보서」를 기안하고, 피고인 권■, 동 양■가 순차로 위 「94. 2/4분
기 안전점검결과통보서」에 결재함으로써 공무원이 직무에 관하여 허위
의 공문서 1매를 작성하고

나.

- 같은날 위 도로시설과 사무실에서 위 김■로 하여금 위 가항 기재와
같이 허위내용이 기재된 「94. 2/4분기 안전점검결과통보서」 1매를 서
울시청 민방위과장에게 발송하여 그 시경 도달하게 함으로써 이를
행사하고

다. 위 가항 기재와 같이 행사할 목적으로

- 피고인 이■은 1994. 9. 30. 위 서울시청 도로국장 사무실에서 피고
인 양■로부터 관내구청 및 건설사업소에 같은해 7. 29.자로 지시하
여 보고받은 1994년 3/4분기 교량에 대한 일제점검결과를 취합한 결과
성수대교가 신축이음장치에 문제가 있는등 83개의 교량에 하자가 있는
것으로 나타났다는 보고를 받고, 위 교량안전점검결과가 지난 1/4분기
안전점검결과처럼 언론에 보도되어 다시 사회문제화 될 것을 염려한 나
머지 위 가항 기재와 같이 피고인 이■, 같은 양■, 같은 권■의
순으로 위 김■에게 하자교량건수를 대폭 줄이라고 지시하고

- 이에 따라 위 김[]은 아무런 기준도 없이 임의로 잠실대교등 27개의 교량만이 하자가 있고 성수대교를 포함한 나머지 교량은 아무런 하자가 없다는 취지로 된 도로시설과장 명의의 공문서인 「94. 3/4분기 안전점검결과통보서」를 기안하고, 피고인 권[], 같은 양[]가 순차로 위 「94. 3/4분기 안전점검결과통보서」에 결재함으로써 공무원이 직무에 관하여 허위의 공문서 1매를 작성하고

라.

- 같은날 위 도로시설과 사무실에서 위 김[]로 하여금 위 다항 기재와 같이 허위내용이 기재된 「94년 3/4분기 안전점검결과통보서」 1매를 서울시청 민방위과장에게 발송하게 하여 그시경 도달하게 함으로써 이를 행사한

것이다.



행정안전부
국가기록원

[부 록 2]

破斷된 링크垂直材에 設置된 Bracket와
가로보 支持構造物이 垂直材에 미치는
構造的 影響 分析(事故內容 補充說明資料)



행정안전부
국가기록원

작성자 : 서울대학교 토목공학과

교 수 : 장 승 필



조교수 : 김 재 관





행정안전부
국가기록원

1. 개 요

기 제출된 보고서 “파단된 링크수직재에 설치된 Bracket와 가로보 지지구조물이 수직재에 미치는 구조적 영향분석”에서는 다음 두가지 경우에 대한 영향을 분석하여 Bracket및 가로보 지지구조물 설치와 링크수직재 파단과의 상관관계를 규명하였다.

- 수직재와 Pin Plate의 용접이음이 설계대로 시공되었을 경우
- 수직재와 Pin Plate의 용접이음이 부실 시공된 경우 (실제 시공상태)

첫번째 경우의 영향분석을 위해서 설계도와 Bracket등의 실측치에 근거하여 수직재 거동해석 모델을 수립하였고, 이 모델을 사용하여 Bracket등이 수직재에 미치는 구조적 영향이 가장 클 것으로 판단되는 하중조건 하에서의 영향을 해석하였다. 그 결과 만약 수직재와 Pin Plate와의 용접이음이 설계대로 시공되었다면 Bracket등의 설치로 인해서 링크수직재의 상단 용접이음부가 파단되었을 가능성은 극히 희박하다는 결론에 도달하였다.

두번째 경우에 대한 영향분석은 첫번째 경우에 대한 해석결과와 파단면의 사진 Bracket등이 설치되지 아니한 수직재의 Pin연결부에서의 균열 발달 상황 및 불량 용접이음 상태에서의 응력집중 현상에 관한 해석결과 등을 이용하여 수행되었다. 그 결과 Bracket등의 설치와는 무관하게, 즉, Bracket 구조물의 설치전 발생되었던 용접이음부의 균열의 성장이 Bracket등의 설치로 인하여 촉진되었을 가능성은 있다는 결론에 도달하였다.

상기 보고서에서 해석적 방법에 의한 Bracket등의 영향 해석시에는 실측치에 근거한 Bracket의 역학적 모델, 설계도에 근거한 구조물 모델이 사용되었고, 하중은 Bracket의 최대영향을 평가할 수 있도록 고려되었다.

그러나, 상기 보고서를 완전히 이해하기 위해서는 영향 해석시에 사용된 역학적 모델링 방법 및 그 근거에 관한 보충자료가 필요하다고 판단되어 여기에 추가하였다.

2. 고려하중

링크수직재의 Pin의 축은 교축 직각방향을 향하고 있다. 따라서, Pin에서의 회전이 자유롭게 발생한다면 링크수직재의 상단과 하단은 교축방향으로 자유롭게 운동을 일으킬 수 있어야 한다. 그러나, 교축 직각방향으로는 수직재의 양단에서 회전이 구속되어 있으며 Gusset Plate는 그 구속의 정도를 더욱 높일 뿐 아니라, 링크수직재의 연직축을 회전중심으로 하는 비틀운동도 구속을 하고있다.

따라서, 상부 Gusset Plate의 하변에 설치된 Bracket, 하부 Gusset Plate 상변에 설치된 가로보 지지구조물은 기본적으로 링크수직재의 교축방향운동을 구속하게된다. 그러나, 교축 직각방향 운동이나 연직축을 중심으로한 회전 운동(비틀)은 이미 Pin 방향과 Gusset Plate에 의해서 구속이 되어 있기 때문에 Bracket등으로 인해서 추가로 구속되는 효과는 기대할 수 없다. 이것은 풍하중 등에 의해서 교축 직각방향으로의 휨응력 또는 연직축을 중심으로한 비틀응력등은 수직재에 발생할 수 있을 것이나, 이러한 응력들이 Bracket이나 가로보 지지구조물에 의해서 추가적으로 영향을 받을 가능성은 극히 낮다는 것을 의미한다.

Bracket이나 가로보 지지구조물은 주로 링크 수직재의 교축방향으로의 자유로운 운동을 구속함으로써 해서 링크수직재에 구조적 영향을 줄 수가 있고 이러한 교축방향 수평운동을 가장 크게 일으킬 수 있는 것은 온도하중이다. 그러므로 온도하중 작용시에 Bracket 또는 가로보 지지구조물에 의해서 발생하는 응력을 다른 하중들, 즉, 사하중, 활하중, 풍하중등에 의해서 발생하는 응력과 중첩함으로써 수직재의 최종 응력상태는 파악될 수 있다.

보고서에서는 수직재의 최종응력상태를 평가할 때 사하중, 활하중, 온도하중, Pin 마찰력의 조합을 고려하였고, 활하중으로는 DL-18 하중이 사용되었다. 이 하중조합에서 DL-18 하중을 적용하거나, DL-24 하중을 적용하거나 Bracket의 영향은 변함이 없다. 단지 증가된 활하중으로 인해서 수직재의 최종응력상태만이 변화할 수 있을 뿐이다. 그러나, DL-24 하중을 고려하더라도 최종응력은 허용응력을 초과하지 않거나 초과하더라도 항복강도보다는 훨씬 낮기 때문에 설계대로 용접이음이 시공되었다면 보고서에서 도달한 결론은 달라지지 않는다.

Bracket등의 영향을 포함한 수직재의 최종응력 상태 평가에 사하중+활하중+온도하중+풍하중의 하중조합이 적용될 수도 있다. 그러나, 이러한 경우 허용응력은 35% 증가될 수 있기 때문에 보고서의 결론에는 아무런 영향을 줄 수가 없다.

3. Bracket 모델링

링크수직재의 교축방향 운동이 Bracket에 의해서 구속되는 경우에는 Bracket 구조물을 구성하는 세편의 까치발과 Steel Box간에 인장력 또는 압축력과 전단력이 발생하게 된다. 그러나, 이러한 힘의 전달기능이 상실된다면 Bracket의 구속기능도 상실하게 된다.

각 까치발에 의한 구속기능은 역학적으로 교축방향 수평지점과 수직방향 Spring으로 모델링될 수 있다. 왜냐하면 교축 직각방향 운동과, 연직축을 중심으로 한 비틀은 Gusset Plate에 의해 이미 구속이 되어있는 상태이고 까치발 1편에 의해서 저항할 수 있는 모멘트는 영에 가깝기 때문이다. 각 까치발에 의해서 저항할 수 있는 힘의 크기는 까치발과 Steel

Box간의 용접이음에 의해서 결정되게 된다. 그 용접은 Fillet 용접같이 되어 있는데 다음에 설명하는 바와 같이 그 시공 상태는 매우 불량하여 구조적 목적의 용접이음이라고 보기는 극히 곤란하다.

〈사진 1은 P10-P11〉 경간의 파단된 동측 수직재 상단에 설치되어 있던 Bracket 구조물을 구성하였던 Steel Box의 저면 사진이고, 〈사진 2, 3, 4〉는 용접부를 확대한 상세사진이다. 이 사진에서 판명할 수 있는 것은 우선 용접이 단속적으로 이루어져 있는 사실이다.

Fillet 용접의 유효길이는 연속적으로 용접되어 있는 구간에서 개시점의 불완전 부분과 종단부의 크레이터를 제외한 완전한 단면을 갖는 용접금속의 길이를 뜻한다. 그리고 힘의 전달기능을 갖춘 최소 유효 용접길이는 현 도로교 표준시방서에서는 8cm, 1968년도판 용접 강도로교 표준시방서에서는 4cm로 규정되어 있다. 따라서, 사진으로부터 확인할 수 있는 용접은 이러한 요구조건을 만족시킨다고 판단되지 않는다. 또한 사진에서는 용접금속의 외측에서 다른 쪽 용접금속 외측까지의 폭은 최대 3.3cm 정도이고 여기에서 까치발의 폭 2.4cm를 감하면 까치발의 양측에 약 최대 4.5mm 정도의 용접금속이 붙어 있을 수 있어서 가능한 유효두께의 최대값은 약 3mm가 될 수 있으나 이 용접금속은 크레이터와 구분할 수 없는 상태여서 유효두께를 가진다고 할 수 없다.

또한 현 도로교 표준시방서와 1968년도판 용접 강도로교 표준시방서에서는 Fillet 용접의 최소 유효두께를 6mm이상으로 규정하고 있다. 따라서, 사진에서 그 상태를 확인할 수 있는 용접이음은 구조적 관점에서는 유효길이도, 유효두께도 갖지않는 비구조적 용도의 용접으로 간주되어야 한다.

그러나, 기 제출된 보고서에서는 Bracket의 영향을 실제 예상되는 것보다도 큰 쪽으로 평가할 목적으로 용접의 유효길이는 용접가능길이의 절

반으로 취하였고, 유효두께는 AISC에서 규정되어 있는 최소유효두께 3mm로 가정하여 Steel Box와 까치발 간에 전달될 수 있는 최대인장력/압축력 또는 전단력 계산에 적용하였다.

최대저항력의 평가에는 일반적으로 재료의 항복강도가 적용되나 보고서에서는 Bracket의 영향을 실제보다 큰 쪽으로 평가하기 위해서 항복강도 230 0kg/cm²보다 훨씬 큰 극한강도 4100kg/cm²이 최대저항력산출에 사용되었다. 보고서에서 까치발 1편당 전달할 수 있는 인장력/압축력 또는 전단력의 최대값으로 산출한 10.4ton은 실제 상태에서 가능한 값보다 훨씬 높은 값이며, 따라서, Bracket의 영향을 실제보다 높은 쪽으로 평가될 수 있게하였다.

보고서에서는 Bracket의 영향을 평가함에 있어서 최대영향을 해석하기 위해서 온도변화폭 $\Delta T = 35^{\circ}\text{C}$ 가 고려되었다. 그러나, 온도변화폭은 $\Delta T = 12^{\circ}\text{C}$ 이상이면 이미 세개의 까치발 중 외측 2개의 까치발의 용접부에서의 인장력/전단력 전달기능은 상실하게 된다. 압축력이 작용할 경우에는 외측의 까치발에서는 압축력 전달기능은 유지될 수 있으며 마찰에 의한 전단력 전달기능도 유지될 수 있다. 따라서, 온도의 변화폭이 작거나 또는 수직재 상, 하단의 상대수평변위가 작을 경우에는 외측 까치발의 용접 이음부가 먼저 파괴될 가능성이 높게 된다. 그러나, 그 최대영향은 보고서에 작성된 것과 차이가 없게 된다.

Bracket의 영향을 해석할 때 사용된 모델은 3차원 해석모델이다. 앞서 설명하였듯이 Gusset Plate등으로 인하여 교축 직각방향으로의 변위와 비틀림은 Bracket 설치 지점에서 구속되어 있으므로 Bracket은 수직방향 스프링과 수평지점으로 모델링되었다. 그러나, 3차원적 비대칭 구속조건에 의해서 발생하는 비틀림의 영향등은 이미 3차원 해석모델에 고려되어 있다.

4. 해석결과의 적용

보고서에서 수행한 해석은 어디까지나 극한상태에 대한 해석이며, Bracket 영향의 최대한계를 계산한 것이다. 구조물이 설계서에서와 같이 이상적으로 거동한다고 전제한 상태에서 시방서에서 규정한 최대하중을 부과하였으므로 이러한 극한상태에 대한 해석결과는 실제상태에서 관측되는 현상과는 차이가 있을 수 있다. 현재 보고서의 해석은 우선 수직재와 Pin Plate의 용접이음이 설계대로 아무런 결함없이 시공되었다는 것을 전제하였고, 또한, 상·하현재의 Sleeve와 상판구조의 신축이음이 설계된 대로 기능(수평방향으로의 원활한 움직임)을 발휘한다는 것을 전제하였다. 따라서, 만약 이러한 전제조건이 충족되지 않는다면 그 해석결과는 실제 관측결과와 다를 수 있다.

특히, 상·하현재의 Sleeve, 및, 상판구조의 신축이음이 그 기능을 발휘하지 못하면 Bracket등에 의한 수직재 운동의 구속이 수직재에 미치는 영향은 급격히 감소하게 된다. 이러한 경우에는 온도변화가 일어나더라도 수직재 상·하단의 상대변위는 매우 작게 발생하게 되며, 따라서, Bracket등으로 인한 구속의 영향도 극히 미미하게 된다.

성수대교의 P11-P12 경간에서의 바닥틀의 신축이음부와 상·하현재의 Sleeve를 관찰한 결과 상대운동의 흔적이 전혀 없거나 있더라도 그 크기는 극히 작음을 알 수 있었다. 따라서, 온도변화에 의해서 발생한 수직재 상·하단의 상대변위는 극히 작았고, 따라서, Bracket등으로 인하여 수직재의 응력상태는 크게 영향을 받지 아니하였다고 추정된다.

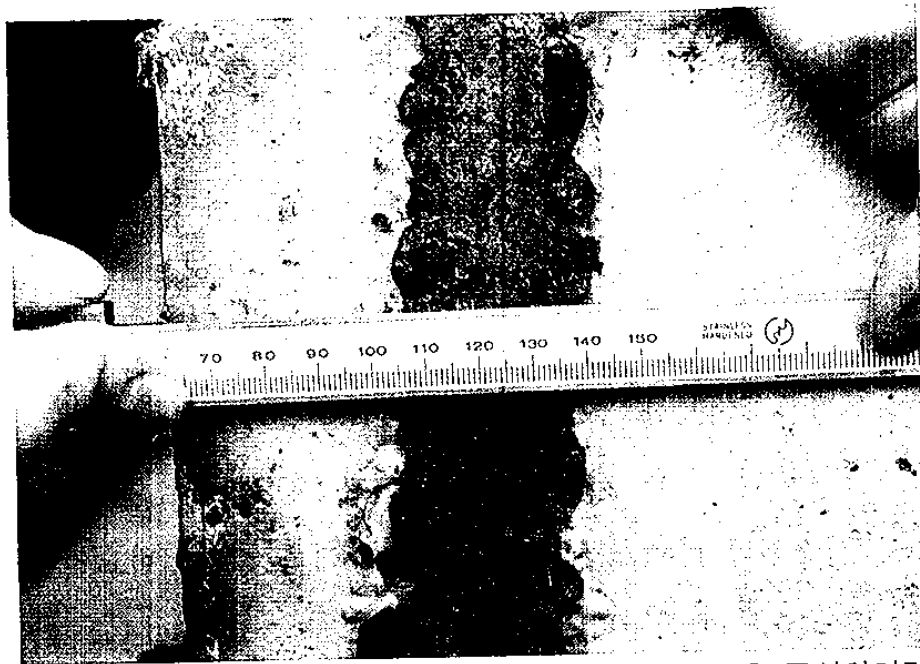
5. 요 약

- (1) Bracket의 수직재에 미치는 영향은 하중조합에 따라서 달라지지 않는다. 그러나, 수직재에 발생한 최종응력상태는 하중조합에 따라서 변화할 수 있다. 그렇더라도, Bracket설치로 인해 수직재의 파단이 유발될 가능성은 극히 희박하다.
- (2) Pin의 방향, Gusset Plate등에 의해서 Bracket 설치지점에서 수직재의 교축직각방향운동과 연직축을 중심으로 한 회전운동은 구속되어 있다. 따라서, Bracket은 교축방향운동을 구속하는 역할을 하게 되며, 이러한 경우 Bracket의 영향은 역학적으로 수직방향 Spring과 수평방향 지점으로 모델링될 수 있다.
- (3) P10-P11 경간의 동측수직재에 설치되었던 Steel Box와 까치발과의 용접이음은 지극히 불량하여 구조적 용접이라고 할 수 없다. 따라서, 보고서에서 사용된 전달가능 인장력, 압축력, 또는 전단력의 최대값 10.4 ton에 의한 Bracket의 영향은 실제보다 더 크게 평가된 것이다.
- (4) 수직재 거동해석에는 3차원 해석모델이 사용되었으며, 이 모델에 의해서 3차원 비대칭 구속조건에 의해 발생하는 비틀림의 영향들도 고려된다.
- (5) 해석은 어디까지나 수직재와 Pin Plate와의 용접이음이 설계대로 시공되었고, 상·하현재의 Sleeve 및 상판구조의 신축이음이 그 기능을 잘 유지한다는 것을 전제한 모델에 의해서 수행되었다. 또한, 해석에서는 Bracket 영향의 최대 한계를 파악하고자 시방서에서 규정한 최대온도변화폭이 사용되었다. 따라서, 관측결과와 해석결과를 비교할 때는 이러한 사항들이 고려되어야 한다.
- (6) Sleeve와 상판구조의 상대운동혼적이 경미하므로 수직재에는 온도하중에

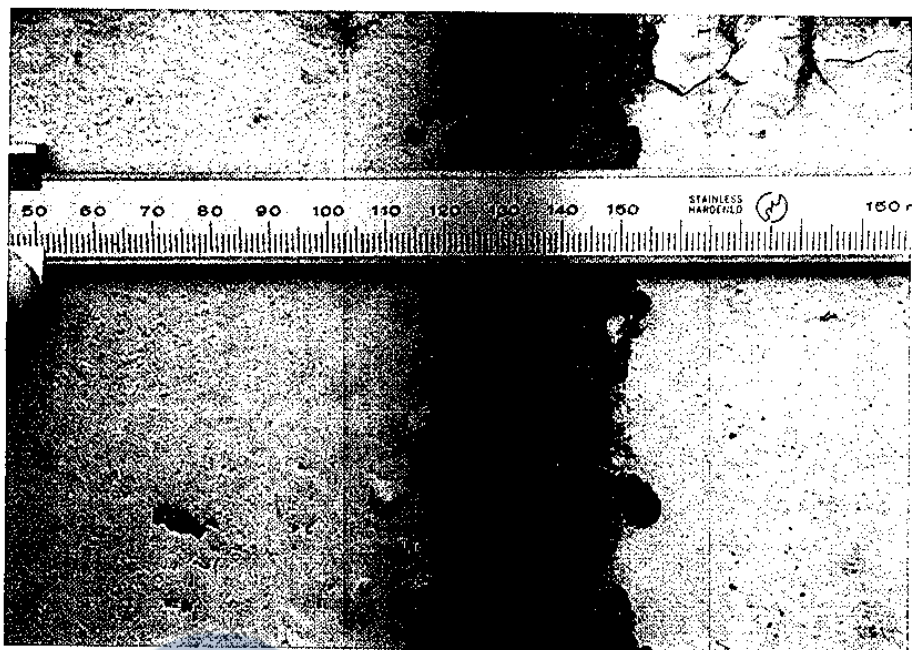
의해서 큰 상대변위가 발생하지 않았고, 그 결과 Bracket의 구속으로 인한 영향도 경미하였을 것으로 추정된다



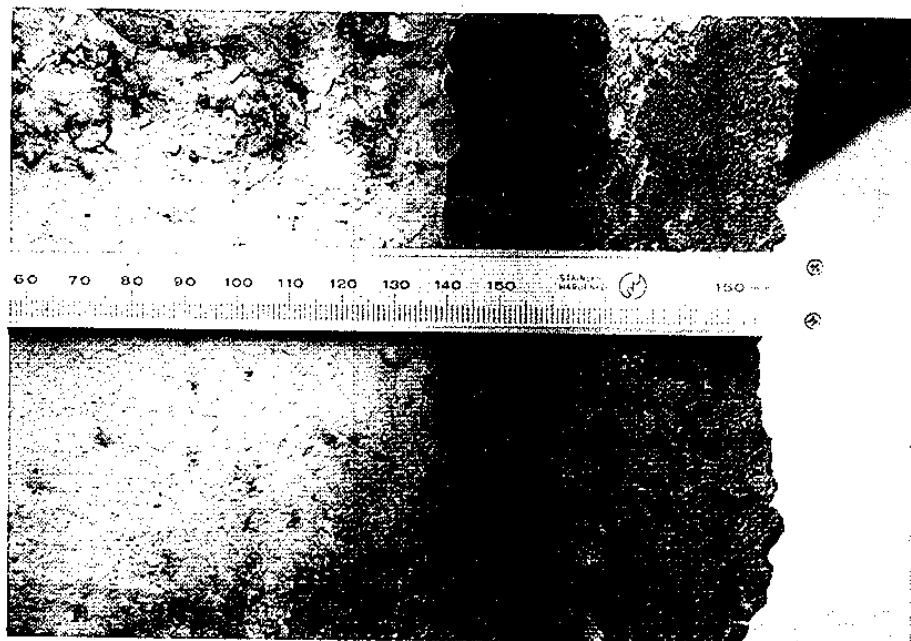
〈사진 1. P10-P11〉 경간 동측수직재 Bracket 구조물을 구성하였던 Steel Box저면사진



〈사진 2. P10-P11〉 경간 동측수직재 Bracket 구조물을 구성하였던 Steel Box와 까치발과의 용접부 상세사진 I



〈사진 3. P10-P11〉 경간 동측수직재 Bracket 구조물을 구성하였던
Steel Box와 까치발과의 용접부 상세사진 II



〈사진 4. P10-P11〉 경간 동측수직재 Bracket 구조물을 구성하였던
Steel Box와 까치발과의 용접부 상세사진 III



행정안전부
국가기록원

[부록 3]

鑑定人 龍煥鮮 教授(서울地方法院
聖水大橋 事件 第1審 法院 選定)의
鑑定結果에 대한 意見書



행정안전부
국가기록원

작성자 : 서울대학교 토목공학과

교수 : 장 승 필



조교수 : 김 재 관

